

# 铁闪锌矿及其煅烧产物的光催化性能研究<sup>①</sup>

王远凡<sup>1,2</sup>, 赵宇霏<sup>1,2</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>, 刘晓文<sup>1,2</sup>

(1.中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083; 2.矿物材料及其应用湖南省重点实验室, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 采用煅烧法合成了铁闪锌矿改性产物, 以其为光催化剂, 在紫外光照射下降解有机染料亚甲基蓝, 并通过紫外-可见漫反射光谱和自由基捕获实验研究该光催化剂的降解机理。结果表明, 660 °C 煅烧的铁闪锌矿样品具有良好的光催化性能, 在 240 min 内对亚甲基蓝的降解率达到 98.46%。铁闪锌矿煅烧产物中, 三元异质结比二元异质结更有利于光生载流子的有效分离, 提升光催化性能。

**关键词:** 铁闪锌矿; 煅烧; 相变; 光催化; 降解; 亚甲基蓝; 光催化剂

中图分类号: TF046; O644

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.035

文章编号: 0253-6099(2025)03-0207-05

## Photocatalytic Properties of Marmatite and Its Calcined Product

WANG Yuanfan<sup>1,2</sup>, ZHAO Yufei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, LIU Xiaowen<sup>1,2</sup>

(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory for Mineral Materials and Application, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

**Abstract:** Marmatite was calcined and then used as photocatalyst to degrade organic dye methylene blue (MB) under ultraviolet (UV) light irradiation. The degradation mechanism of this photocatalyst was investigated by using UV-Visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis DRS) and performing free radical capture experiments. It is found that the marmatite calcined at 660 °C exhibits a great photocatalytic property, with the degradation rate of MB up to 98.46% within 240 min. In the calcined marmatite products, the ternary heterojunction is more conducive to the effective separation of photogenerated charge carriers than the binary heterojunction, thus leading to an improved photocatalytic performance.

**Key words:** marmatite; calcination; phase transformation; photocatalysis; degradation; methylene blue (MB); photocatalyst

由于矿物材料在环保性能和性价比等方面的优势, 环境矿物材料的研究与应用已成为矿物材料学很重要的方向之一<sup>[1]</sup>。铁闪锌矿中含有大量杂质元素, 尤其是其中的 Fe<sup>2+</sup> 掺杂, 使铁闪锌矿的理论禁带宽度下降<sup>[2]</sup>; 同时天然铁闪锌矿本身的疏水性致使其与降解物分子接触不充分, 制约了天然铁闪锌矿潜在的光催化活性<sup>[2]</sup>。煅烧法可以改变天然矿物物相组成和表面结构, 从而提高其光催化降解能力。本文通过煅烧法制备具有不同物相组成的铁闪锌矿煅烧产物, 通过降解亚甲基蓝测定铁闪锌矿及其煅烧产物的光催化降解性能, 并通过紫外-可见漫反射光谱和自由基捕获

实验阐明降解机理。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

铁闪锌矿样品来自内蒙古某矿, 外观为黑色。电子探针测得其化学成分如表 1 所示。

表 1 铁闪锌矿原矿化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of marmatite					%
Zn	Fe	In	S	其他	总计
49.75	15.57	0.04	34.63	0.01	100.00

① 收稿日期: 2024-12-23

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项基金(2022ZZTS0500)

作者简介: 王远凡(1999—), 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要研究方向为纳米矿物复合材料。E-mail: 215612080@csu.edu.cn

通信作者: 刘晓文(1966—), 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要研究方向为矿物晶体化学, 纳米矿物复合材料。E-mail: lxwdr@csu.edu.cn

## 1.2 实验试剂

实验所用化学试剂包括溴化钾、对苯醌、无水乙醇、叔丁醇、亚甲基蓝和乙二胺四乙酸二钠,均为分析纯试剂。

## 1.3 铁闪锌矿煅烧实验

将铁闪锌矿在玛瑙研钵中研磨至  $5\ \mu\text{m}$ 。分别取  $3\ \text{g}$  研磨后的铁闪锌矿样品放于瓷舟中,转入马弗炉中煅烧,煅烧温度分别为  $660\ \text{°C}$  和  $1\ 200\ \text{°C}$ ,升温速率为  $10\ \text{°C}/\text{min}$ ,保温时间为  $3\ \text{h}$ 。

## 1.4 实验表征

采用 EMPA-1720H 电子探针确定原料化学成分。使用 STA449C 热分析仪测定样品升温过程的热重-差热曲线(TG-DSC)。通过 TD-3500 X 射线衍射仪(XRD)表征样品晶相结构,并用 Jade 6 软件结合 PDF4+数据库对 XRD 图谱中的晶相进行识别。利用 MIRA3 扫描电镜(SEM)观察样品微观形貌。采用 TENSOR II 红外光谱仪(FTIR)识别样品中的化学键及基团。使用 Evolution 220 紫外-可见分光光度计测量样品紫外-可见漫反射光谱(UV-Vis)和液体样品的吸光度。

## 1.5 光催化性能测试

通过催化降解亚甲基蓝测试材料的光催化性能,操作过程如下:称取  $25\ \text{mg}$  铁闪锌矿或其煅烧产物加入  $50\ \text{mL}$  质量浓度  $10\ \text{mg}/\text{L}$  的亚甲基蓝溶液中;在无光照环境下吸附并搅拌,每隔  $30\ \text{min}$  取  $2\ \text{mL}$  悬浮液,测定  $664\ \text{nm}$  处的吸光度,直至吸光度不发生变化,表明达到了吸附-解吸平衡。平衡后打开光源( $30\ \text{W}$  紫外灯),将混合溶液在光照下持续搅拌,每隔  $30\ \text{min}$  取  $2\ \text{mL}$  悬浮液,离心分离悬浮液中的粉末样品,测定  $664\ \text{nm}$  处的吸光度。

# 2 实验结果与讨论

## 2.1 铁闪锌矿高温相变过程分析

图 1 为铁闪锌矿的 TG-DSC 图谱。DSC 曲线出现一窄一宽的 2 个吸热峰: $520\sim 600\ \text{°C}$  的吸热峰归因于  $\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$  的生成与  $\text{SO}_2$  气体的释放, $700\sim 800\ \text{°C}$  的吸热峰是由于  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$  和  $\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$  转变成了  $\text{ZnO}$  和  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  并释放了  $\text{O}_2$  和  $\text{SO}_2$  气体。TG 曲线显示,整个煅烧过程中质量损失为  $15.87\%$ 。 $520\ \text{°C}$  之前,主要是矿物表面吸收的水分蒸发,质量损失较小( $1.15\%$ )。 $520\sim 800\ \text{°C}$  范围内,出现了明显的质量损失,在此过程中  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$  不断氧化并放出  $\text{SO}_2$  气体,最终生成  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  和  $\text{ZnO}$ ,而  $\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$  为中间产物。天然铁闪锌矿从室温煅烧至  $1\ 200\ \text{°C}$  过程中的物相变化为:室温  $\sim 520\ \text{°C}$ ,物相为  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$ ;  $520\sim 750\ \text{°C}$ ,

物相为  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$ 、 $\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$ 、 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{ZnO}$ ;  $750\sim 1\ 200\ \text{°C}$ ,物相为  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{ZnO}$ 。 $520\sim 750\ \text{°C}$  范围内,由于  $\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$  不是半导体,该体系的光催化性能与  $\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$  含量有关; $660\ \text{°C}$  煅烧产物中铁闪锌矿、 $\text{ZnO}$  和  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  的质量比约  $1:3:5$ ,体系内存在  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}/\text{ZnO}/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  异质结,其光催化降解性能好。煅烧至  $750\ \text{°C}$  后体系物相不再改变,随着温度升高,样品结晶度有所提高,催化效率逐渐升高<sup>[2]</sup>。

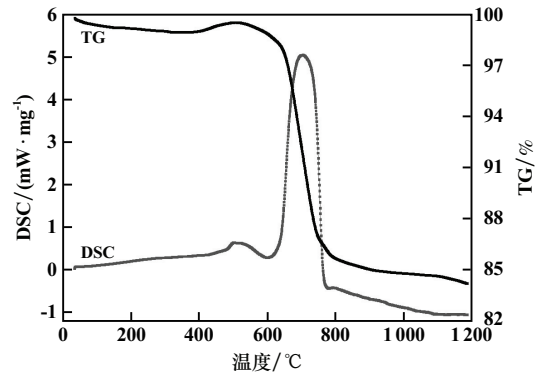


图 1 铁闪锌矿的 TG-DSC 图谱

Fig. 1 TG-DSC spectra of marmatite

## 2.2 铁闪锌矿及其煅烧产物物相分析

铁闪锌矿及煅烧产物的 XRD 图谱如图 2 所示。铁闪锌矿中  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$  的衍射峰位于  $2\theta = 28.48^\circ$ 、 $33.02^\circ$ 、 $47.40^\circ$ 、 $56.24^\circ$ 、 $59.02^\circ$ 、 $69.28^\circ$ 、 $76.49^\circ$  和  $79.08^\circ$  处,分别对应于  $(111)$ 、 $(200)$ 、 $(220)$ 、 $(311)$ 、 $(222)$ 、 $(400)$ 、 $(331)$  和  $(420)$  晶面 (PDF#01-073-6559)。铁闪锌矿 XRD 图谱中没有观察到杂质峰。 $660\ \text{°C}$  煅烧产物在  $2\theta = 22.6^\circ$ 、 $25.5^\circ$  和  $26.6^\circ$  处出现了新的衍射峰,与  $\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$  的衍射峰匹配 (PDF#01-073-9989),此外还出现了  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  (PDF#01-070-6490) 和  $\text{ZnO}$  (PDF#01-075-0591)。与铁闪锌矿曲线相比,  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$  的各衍射峰向高角度方向偏移,表明样品中可能存在  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}/\text{ZnO}/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  异质结。 $1\ 200\ \text{°C}$  煅烧产物已无  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$  衍射峰和

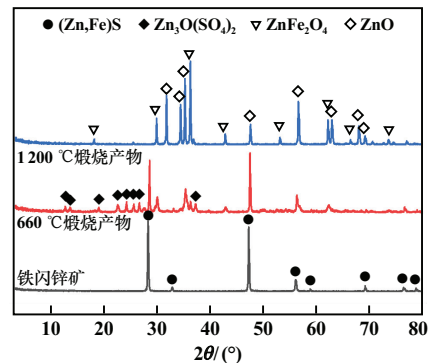


图 2 铁闪锌矿及其煅烧产物的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of marmatite and calcined products

Zn<sub>3</sub>O(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 衍射峰。与 660 °C 煅烧产物相比,1 200 °C 煅烧产物 ZnO 与 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 衍射峰均有不同程度的偏移,证明 ZnO 和 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 界面之间发生了反应,可能是 ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结的作用。

图 3 为铁闪锌矿及煅烧产物的红外光谱图。铁闪锌矿曲线中,在 1 141 cm<sup>-1</sup> 处,由于 CO<sub>2</sub> 吸附在铁闪锌矿表面,产生了 C=O 伸缩振动。羟基的拉伸和弯曲的吸收带分别位于 3 691 和 1 634 cm<sup>-1</sup> 处,这是由于大气中的 H<sub>2</sub>O 吸附在铁闪锌矿样品表面<sup>[3]</sup>。914~1 020 cm<sup>-1</sup> 的吸收带源自硫化物离子在铁闪锌矿中振动模式间的共振相互作用<sup>[4]</sup>。660 °C 煅烧产物中这一振动带发生了明显的蓝移,说明 660 °C 煅烧产物中 (Zn, Fe)S 与新生成的 ZnO 和 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 之间产生了新键<sup>[5]</sup>。660 °C 煅烧产物和 1 200 °C 煅烧产物中 482~550 cm<sup>-1</sup> 处的吸收带对应 Zn—O 键在四面体位置上的伸缩振动<sup>[6]</sup>, 432 和 623 cm<sup>-1</sup> 处的特征带归因于 Fe—O 键的伸缩振动,分别属于八面体和四面体位点的吸收<sup>[7]</sup>,而这两处峰位的偏移说明 2 种样品中均存在界面作用。结合 XRD 数据可知,660 °C 煅烧产物和 1 200 °C 煅烧产物中分别存在 (Zn, Fe)S/ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结和 ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结。

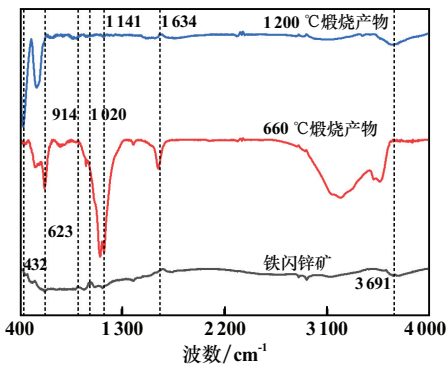


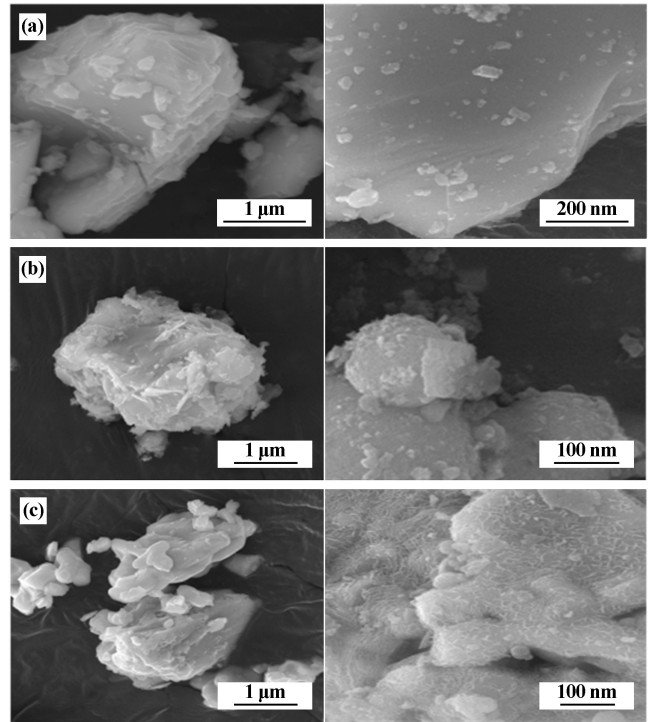
图 3 天然铁闪锌矿及其煅烧产物的 FT-IR 图谱  
Fig. 3 FT-IR spectra of natural marmatite and its calcined products

### 2.3 铁闪锌矿及其煅烧产物形貌分析

图 4 为铁闪锌矿及煅烧产物的扫描电子显微镜图。研磨后的铁闪锌矿颗粒尺寸较小,粒径在 5 μm 以下。660 °C 煅烧后颗粒粒度增大,且出现了形貌差异很大的颗粒,说明体系内产生了新相<sup>[8-9]</sup>。1 200 °C 煅烧产物表面可观察到大量 ZnO 和 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的细小析出颗粒<sup>[10]</sup>。

### 2.4 铁闪锌矿及其煅烧产物光催化降解性能

图 5 为铁闪锌矿及其煅烧产物对亚甲基蓝的光催化降解曲线。黑暗条件下所有样品在 1 h 内对亚甲基蓝的暗吸附均达到了吸附-解吸平衡,铁闪锌矿、



(a) 铁闪锌矿; (b) 660 °C 煅烧样品; (c) 1 200 °C 煅烧样品

图 4 铁闪锌矿及其煅烧产物的扫描电子显微镜图

Fig. 4 Scanning electron microscope images of marmatite and calcined products

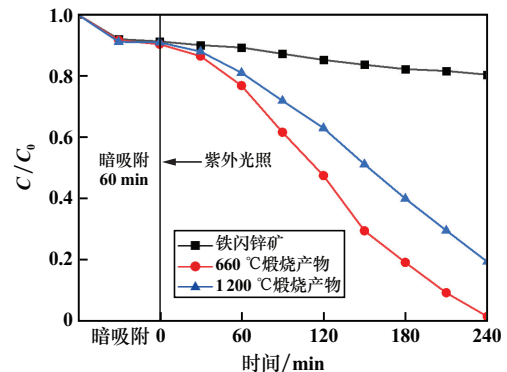


图 5 铁闪锌矿及其煅烧产物对亚甲基蓝的光催化降解曲线  
Fig. 5 Photocatalytic degradation curve of MB with marmatite and its calcined products

660 °C 煅烧产物、1 200 °C 煅烧产物在 240 min 内对亚甲基蓝的降解率分别为 19.6%、98.5%、80.6%。可以看出,660 °C 煅烧产物催化效率更高。

### 2.5 铁闪锌矿及其煅烧产物光催化降解机理

#### 2.5.1 自由基捕获实验

选取叔丁醇(TBA)、对苯醌(p-BQ)和乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)分别作为羟基自由基(·OH)、超氧自由基(·O<sup>2-</sup>)、光生空穴(h<sup>+</sup>)的捕获剂。自由基捕获实验的流程与光催化降解实验基本相同,在暗吸附

结束时分别加入 10 mmol 的 TBA、1 mmol 的 p-BQ 和 10 mmol 的 EDTA-2Na。自由基捕获剂对催化降解亚甲基蓝的影响如图 6 所示。与未加入捕获剂的空白对照组相比,加入 TBA、p-BQ、EDTA-2Na 后,660 °C 煅烧产物的催化降解率分别降至 36.78%、46.12% 和 89.40%。可见在催化降解亚甲基蓝过程中,·O<sup>2-</sup> 和 ·OH 是重要的反应活性物质。

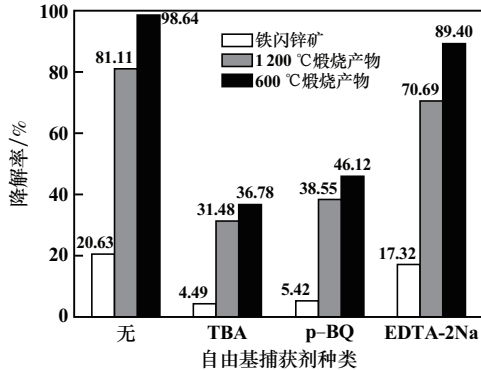


图 6 自由基捕获剂对催化降解亚甲基蓝的影响

Fig. 6 Effect of free radical capture on catalytic degradation of MB

### 2.5.2 铁闪锌矿及其煅烧产物紫外-可见漫反射光谱

铁闪锌矿及其煅烧产物的紫外-可见漫反射光谱如图 7 所示。所有样品的吸收边缘约在 420 nm,在紫外区表现较高的吸收。使用 Kubelka-Munk 公式<sup>[10]</sup>外推得到了 3 种样品的禁带宽度如图 8 所示。铁闪锌矿、660 °C 煅烧产物和 1200 °C 煅烧产物的禁带宽度分别为 3.306、3.300 和 3.269 eV,均低于纯 ZnS 的禁带宽度(3.600 eV)。煅烧后铁闪锌矿的禁带宽度降低可能是其光催化效率较高的原因之一。

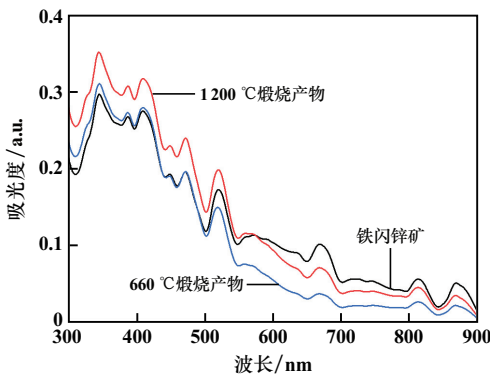


图 7 铁闪锌矿及其煅烧产物的紫外-可见漫反射光谱  
Fig. 7 UV-Vis diffuse reflectance spectra of marmatite and its calcined products

### 2.5.3 铁闪锌矿及其煅烧产物光催化机理

铁闪锌矿、1200 °C 煅烧产物和 660 °C 煅烧产物的光催化降解示意图见图 9。在紫外光照射下,原始及

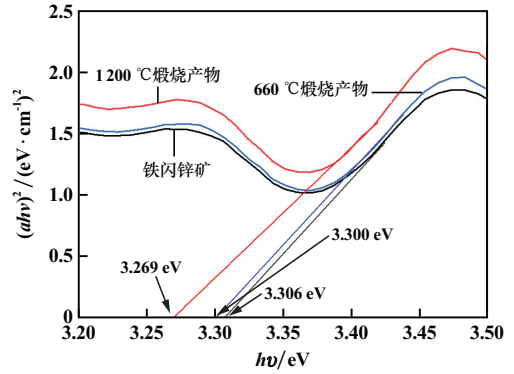


图 8 铁闪锌矿及其煅烧产物的 Kubelka-Munk 能量曲线  
Fig. 8 Kubelka-Munk energy curves of marmatite and its calcined products

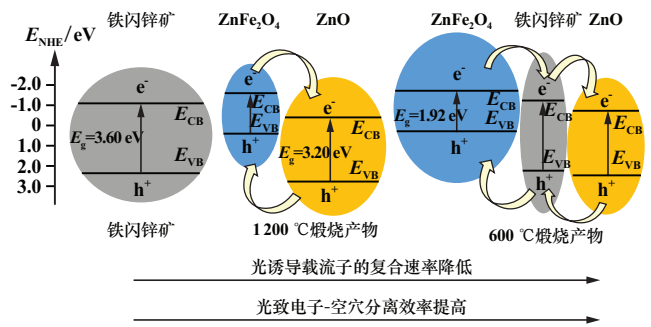


图 9 铁闪锌矿及煅烧产物的光催化降解示意图

Fig. 9 Schematic diagram of photocatalytic degradation of marmatite and its calcined products

煅烧铁闪锌矿在光子能量 ( $h\nu$ ) 等于或超过激发能量 ( $E_g$ ) 的光照下发生光诱导过程。这些光激发电子可与 O<sub>2</sub> 反应生成 ·O<sup>2-</sup>,而光激发空穴可与 H<sub>2</sub>O/OH<sup>-</sup> 反应生成 ·OH 自由基。在光催化降解过程中,形成的 ·OH、·O<sup>2-</sup> 和空穴可将 MB 降解为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和其他降解产物;此外,光激发电子还可将 Fe<sup>3+</sup> 还原成 Fe<sup>2+</sup>,进一步促进氧化还原过程<sup>[11]</sup>。660 °C 煅烧产物和 1200 °C 煅烧产物中分别存在 (Zn, Fe)S/ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结和 ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结。这三者光催化降解效率的差异表明, (Zn, Fe)S/ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结和 ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结均能增强光催化降解性能。这将提供更多的活性位点来捕获电子或空穴,从而改善光催化性能。(Zn, Fe)S/ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结可更高效确保光激发载流子的有效分离。

## 3 结论

研究了铁闪锌矿在高温下的相变过程,采用相同的加热速率(10 °C/min),在不同温度下对铁闪锌矿进行高温热处理,制备了不同物相组成的铁闪锌矿煅烧

产物。铁闪锌矿煅烧后其禁带宽度一定程度降低,光催化性能得以提升,240 min内,铁闪锌矿、660℃煅烧产物和1200℃煅烧产物对亚甲基蓝的降解率分别为19.6%、98.5%和80.6%。通过自由基捕获实验发现亚甲基蓝的降解中 $\cdot\text{O}^{2-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 是重要的反应活性物质。铁闪锌矿煅烧产物中,三元异质结比二元异质结更有利于光生载流子的有效分离,提升光催化性能。

### 参考文献(References):

- [1] 汪灵. 矿物材料学原理[M]. 北京:地质出版社, 2023.  
WANG Ling. Principles of mineral materials science[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2023.
- [2] LIU X W, ZHANG X, LIU Y Y, et al. Influence of ZnS crystal morphology on adsorption-photocatalytic efficiency of pseudocrystal ZnS nanomaterials for methylene blue degradation[J]. Journal of Molecular Structure, 2022, 1256: 132514.
- [3] 黄娇, 顾帼华, 王艳红, 等. 方解石对铁闪锌矿生物浸出行为的影响及机理探讨[J]. 矿冶工程, 2022, 42(5): 92-97.  
HUANG Jiao, GU Guohua, WANG Yanhong, et al. Effect of calcite on bioleaching of marmatite and discussion of its mechanism[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(5): 92-97.
- [4] 张一兵, 陈楠. 紫外光照下改性 A-TiO<sub>2</sub> 降解番红花红 T[J]. 矿冶工程, 2020, 40(3): 133-137.  
ZHANG Yibing, CHEN Nan. Photocatalytic degradation of safranin T by the modified A-TiO<sub>2</sub> under ultraviolet light[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(3): 133-137.
- [5] 周珊, 陶辉锦, 尹健, 等. 不同实验因素对氧化锌光催化性能的影响[J]. 矿冶工程, 2017, 37(5): 95-98.  
ZHOU Shan, TAO Huijin, YIN Jian, et al. Influences of different experimental factors on photocatalytic performance of zinc oxide[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(5): 95-98.
- [6] 张瀚文, 习小明, 卓晓军, 等. TiO<sub>2</sub>-CNTs 复合光催化剂的制备及其光催化性能[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6): 151-155.  
ZHANG Hanwen, XI Xiaoming, ZHUO Xiaojun, et al. Preparation and photocatalytic performance of TiO<sub>2</sub>-CNTs composite photocatalyst[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(6): 151-155.
- [7] 周自成, 刘悦, 李英, 等. 纳米 Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的快速制备及其对亚甲基蓝的类芬顿催化氧化性能[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 153-155.  
ZHOU Zicheng, LIU Yue, LI Ying, et al. Simple and rapid preparation of nano-Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and its fenton-like catalytic oxidation of methylene blue[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4): 153-155.
- [8] 周晓燕, 汤洪波, 周健. Ag-AgI/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> 光催化剂的制备及其光催化性能[J]. 矿冶工程, 2022, 42(1): 152-155.  
ZHOU Xiaoyan, TANG Hongbo, ZHOU Jian. Preparation and photocatalytic performance of photocatalyst of Ag-AgI/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub>[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(1): 152-155.
- [9] LIU X, MIAO X, ZHANG X, et al. Influence of crystal planes exposure ratio on photocatalytic and antimicrobial properties of m-BiVO<sub>4</sub> under LED visible light[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2023, 148: 110357.
- [10] 刘晓文, 谢岚, 陈颖洁, 等. CuS 花状空心微球制备工艺及其光降解性能研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(2): 120-124.  
LIU Xiaowen, XIE Lan, CHEN Yingjie, et al. Preparation and photodegradation property of flower-like CuS hollow microspheres[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(2): 120-124.
- [11] 刘晓文, 陈颖洁, 刘梦佳, 等. ZnS/ZnO/rGO 复合材料的制备及其光催化性能研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(2): 131-135.  
LIU Xiaowen, CHEN Yingjie, LIU Mengjia, et al. Preparation and photocatalytic properties of ZnS/ZnO/rGO composite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(2): 131-135.
- 引用本文: 王远凡, 赵宇霏, 张鑫, 等. 铁闪锌矿及其煅烧产物的光催化性能研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(3): 207-211.  
WANG Yuanfan, ZHAO Yufei, ZHANG Xin, et al. Photocatalytic properties of marmatite and its calcined product[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3): 207-211.
- [13] SHEVCHENKO M O, KUDIN V G, BEREZUTSKII V V, et al. Thermodynamic properties of Al-Sc alloys[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2014, 53(3): 243-249.
- [14] HYDE K B, NORMAN A F, PRANGNELL P B. The effect of cooling rate on the morphology of primary Al<sub>3</sub>Sc intermetallic particles in Al-Sc alloys[J]. Acta Materialia, 2001, 49(8): 1327-1337.
- [15] RADMILOVIC V, TOLLEY A, MARQUIS E A, et al. Monodisperse Al<sub>3</sub>(LiScZr) core/shell precipitates in Al alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(7): 529-532.
- [16] ZHANG X, REN X, LI H, et al. Interfacial properties and fracture behavior of the L1<sub>2</sub>-Al<sub>3</sub>Sc//Al interface: Insights from a first-principles study[J]. Applied Surface Science, 2020, 515: 146017.
- 引用本文: 徐豪, 柏松, 王小锋. 真空热压烧结时间对 Al-30%Sc 合金组织性能的影响[J]. 矿冶工程, 2025, 45(3): 203-206.  
XU Hao, BAI Song, WANG Xiaofeng, et al. Effect of vacuum hot-pressing sintering time on microstructures and properties of Al-30%Sc alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3): 203-206.

(上接第 206 页)