

# Preparation of Magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> Composites from Ilmenite and Its Application in Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants

Sangsang Ma, Gefeng Yu, Yuting Zhang, Qi Su, Lei Li\*

College of Biological, Chemical Sciences and Engineering, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang  
Email: \*leili@mail.zjxu.edu.cn

Received: Jan. 15<sup>th</sup>, 2017; accepted: Feb. 3<sup>rd</sup>, 2017; published: Feb. 10<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

Ilmenite was used as source to prepare TiO<sub>2</sub> and Fe, which were used to prepare magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> photocatalysts via hydrothermal method. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> composites were characterized by XRD, SEM, IR, N<sub>2</sub>-physisorption and UV-Vis diffuse reflectance spectra. The results indicate that the magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> photocatalysts present a high photocatalytic activity and stability for degradation of RhB dye under UV-light and visible light. Therefore, the preparation method not only promotes the utilization of ilmenite, but also directly prepares magnetic and recyclable photocatalysts.

## Keywords

Ilmenite, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Magnetic, Photocatalysis

# 由钛铁矿制备磁性Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>复合物及其在光催化降解有机污染物中的应用

马桑桑, 俞戈凤, 张雨婷, 苏琦, 李雷\*

嘉兴学院生物与化学工程学院, 浙江 嘉兴  
Email: \*leili@mail.zjxu.edu.cn

收稿日期: 2017年1月15日; 录用日期: 2017年2月3日; 发布日期: 2017年2月10日

\*通讯作者。

文章引用: 马桑桑, 俞戈凤, 张雨婷, 苏琦, 李雷. 由钛铁矿制备磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> 复合物及其在光催化降解有机污染物中的应用[J]. 物理化学进展, 2017, 6(1): 9-16. <https://doi.org/10.12677/japc.2017.61002>

## 摘要

以钛铁矿为原料, 分离获得二氧化钛和Fe单质, 并采用水热法制备磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ 光催化材料。采用XRD、SEM、IR、氮气物理吸附和紫外可见漫反射等手段表征了 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ 复合物的结构, 并考察其降解罗丹明B溶液的光催化性能。结果表明, 磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ 光催化材料在紫外光和可见光条件下表现出较好的光催化性能, 并表现出良好的稳定性。故该制备方法既能有效提高钛铁矿的利用率, 也可获得利于回收利用的磁性光催化剂。

## 关键词

钛铁矿,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 磁性, 光催化

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

经济飞速发展, 环境污染、能源枯竭等问题日益显著, 光催化方法因其可直接利用太阳能资源而成为理想的环境污染治理技术和洁净能源生产技术[1]。 $\text{TiO}_2$ 作为其中一种环境友好型高活性光催化剂, 具有无毒、无二次污染等优点[2], 在有机物污水处理方面有极其重要的应用价值。然而, 使用 $\text{TiO}_2$ 粉末光催化剂易失活、难回收、不利于重复利用, 这些问题都限制了这种催化剂的推广使用[3]。

为解决 $\text{TiO}_2$ 光催化剂回收的问题, 可将磁性材料 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 引入 $\text{TiO}_2$ 光催化剂中, 制备磁性光催化复合材料, 从而实现多次回收利用[4][5]。例如, Liu [6]人制备了可磁分离的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2@ \text{Fe}_3\text{O}_4$ 磁性微球, 并具有较高光催化活性。He [7]等人用均相沉淀的方法制备了 $\text{Fe}_3\text{O}_4:\text{TiO}_2$ 壳核纳米粒子, 实验表明, 具有磁性的新型生物材料在可见光区域具有较高的光吸收率和光催化活性, 并且具有超顺磁性。此外,  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{TiO}_2$ 复合纳米材料也被应用到环境保护[8]和抗菌作用[9]等领域。然而, 上述制备磁性复合光催化剂均以化学试剂为原料。

事实上, 钛铁矿作为二氧化钛重要来源, 具有分布广、储量大的优势, 世界现已探明的钛铁矿储量(按 $\text{TiO}_2$ )约3.8亿吨[10][11]。而其含量丰富的铁还没有得到很好的利用。本文用硫酸酸解法从钛铁矿分离出二氧化钛和铁, 用水热处理法制备磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ 磁性光催化材料。这既可提高钛铁矿的利用率, 也可获得可回收的磁性复合光催化材料。

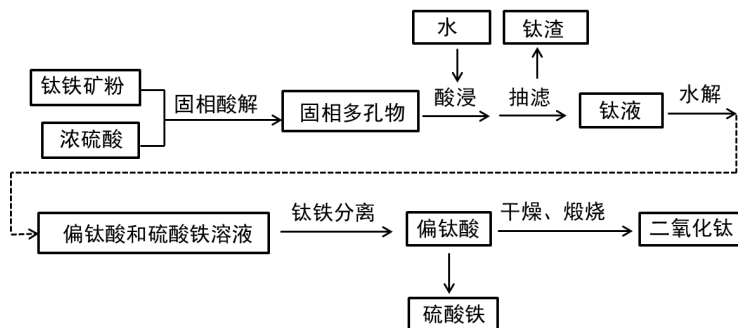
## 2. 实验部分

### 2.1. 由钛铁矿制备 $\text{TiO}_2$ 和硫酸铁溶液

用硫酸法分解钛铁矿(质量百分比为10.76%的 $\text{TiO}_2$ , 76.25%的 $\text{FeTiO}_3$ , 3.14%的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和9.85%的 $\text{SiO}_2$ ) [12], 于纯化后的钛液中添加适量EDTA水解, 实现钛铁分离, 得到硫酸铁溶液和偏钛酸, 再经干燥、煅烧得到 $\text{TiO}_2$ 。其流程如图1所示。实验过程所使用试剂(分析纯)均购于国药集团化学试剂有限公司。

### 2.2. 磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ 光催化材料制备

制备了Ti/Fe摩尔比为3:1的光催化剂制备过程如下: 称取0.20 g ( $2.5 \times 10^{-3}$  mol)的 $\text{TiO}_2$ , 溶于10 mol/L



**Figure 1.** Ilmenite solid-phase sulfuric acid process schematic diagram of the preparation of  $\text{TiO}_2$  and ferric sulfate solution

**图 1.** 钛铁矿固相硫酸法制备  $\text{TiO}_2$  和硫酸铁溶液的流程示意图

的  $\text{NaOH}$  溶液中, 超声 30 min (记为溶液 1)。量取 15 mL 的硫酸铁溶液(浓度可测, 为  $5.5 \times 10^{-5} \text{ mol/mL}^{-1}$ ), 加入 0.1 g 的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)。用 0.1 mol/L 的  $\text{NaBH}_4$  以 5 秒/滴的速度滴加到铁液中, 直至不再有黑色单质铁析出。将磁铁置于烧杯底部, 溶液出现分层, 倾去上清液, 水洗两次, 获得纳米单质铁。将单质铁加入至溶液 1, 继续超声 30 min。超声后装入反应釜内,  $160^\circ\text{C}$  和  $200^\circ\text{C}$ , 水热反应 48 h。反应结束后, 水洗至中性, 于 0.1 mol/L 的醋酸中酸泡 12 h。酸泡过后, 水洗至中性, 烘干, 并在  $600^\circ\text{C}$  管式炉(通  $\text{N}_2$ )中煅烧 3 h, 获得样品记为  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-160}$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-200}$ 。

### 2.3. 光催化性能评价

光催化性能的评价是以罗丹明 B ( $1 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ ) 为目标降解物。将自制的 50 mg 催化剂超声分散于 50 mL 罗丹明 B 中, 暗处理 30 min 后置于石英玻璃管分别在紫外光灯 ( $2 \times 4 \text{ W}$ ) 和可见光(自然太阳光)下进行光降解, 定时取样, 在紫外可见分光光度计中进行浓度分析。

### 2.4. 表征

采用 DX-2600 型 X 射线衍射仪(Cu 靶, 管电压 30 kV, 管电流 20 mA, 扫描速度  $0.1^\circ/\text{s}$ )表征纳米光催化剂的物质结构; 采用 Nova4000e 型(美国康塔公司)仪器进行 BET 比表面积与孔隙度分析; 采用 470FT-IR 型红外光谱仪测试样品表面结构; 采用 SU1510 型扫描电镜观测光催化材料的形貌; 采用 Cary5000 型紫外可见仪测定漫反射吸收光谱( $\lambda = 200\sim 800 \text{ nm}$ )。

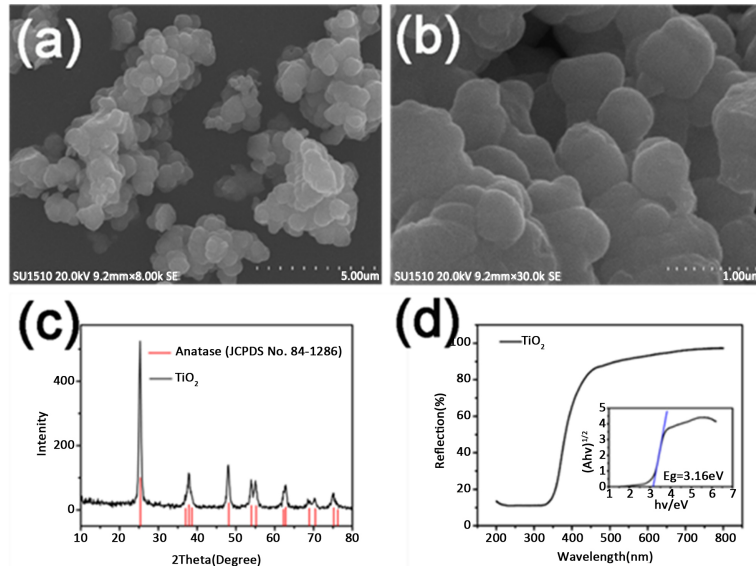
## 3. 结果与讨论

### 3.1. $\text{TiO}_2$ 的结构表征

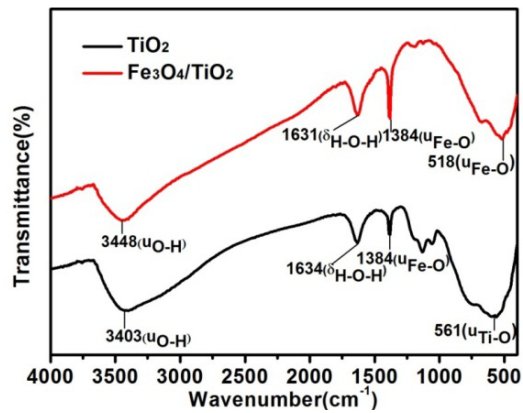
采用固相硫酸法, 从钛铁矿中提取了  $\text{TiO}_2$  材料, 其结构表征结果如图 2 所示。从图中可以看出, 样品 XRD 谱图在  $2\theta$  为  $25.5^\circ$  有个较强烈的衍射峰, 这是锐钛矿  $\text{TiO}_2$  (JCPDS No.:084-1286) (101)晶面的衍射峰, 其中还包括  $38.6^\circ$ 、 $48.0^\circ$ 、 $54.5^\circ$ 、 $55.1^\circ$ 、 $62.8^\circ$  均为锐钛矿(112)、(200)、(211)、(204)的特征峰。从 SEM 图中可见, 所制备的  $\text{TiO}_2$  形貌为微球状(直径约为  $0.5 \mu\text{m}$ ), 且大小均一, 具有较好的分散性。从紫外可见吸收光谱图中可见, 所制备的  $\text{TiO}_2$  的禁带宽度  $E_g$  为 3.16 eV, 这是典型的锐钛矿  $\text{TiO}_2$  的禁带宽度[13]。综上所述, 所制备  $\text{TiO}_2$  样品为纯的锐钛矿  $\text{TiO}_2$ 。

### 3.2. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ 复合材料结构表征

图 3 为  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-160}$  复合材料(Fe/Ti 摩尔比为 1:3)的 IR 图, 其中  $\text{TiO}_2$  在  $3403 \text{ cm}^{-1}$  处的吸



**Figure 2.** Structural characterization of  $\text{TiO}_2$ . (a) (b) SEM; (c) XRD; (d) UV-Vis  
**图 2.**  $\text{TiO}_2$  的结构表征。(a) (b) SEM 图; (c) XRD 图; (d) 紫外可见吸收光谱

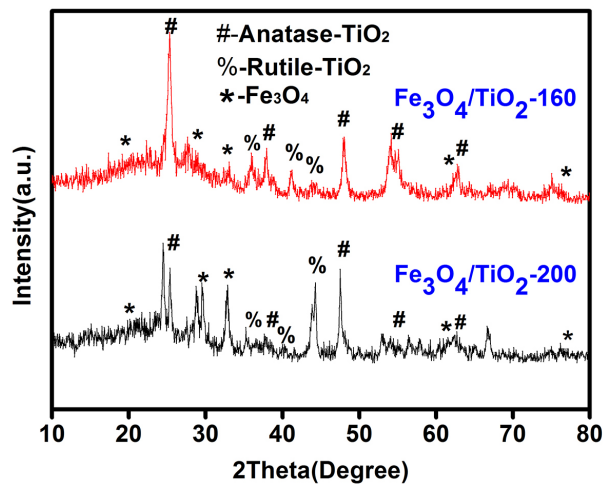


**Figure 3.** IR spectra of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 composite  
**图 3.**  $\text{TiO}_2$  及  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 复合物的红外谱图

收峰和复合材料在  $3448\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰对应于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子表面羟基的伸缩振动峰;  $1631\text{ cm}^{-1}$ 、 $1634\text{ cm}^{-1}$  处为  $\text{H-O-H}$  的弯曲振动吸收峰这归因于  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  磁性复合材料表面吸收的水分子;  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 复合材料  $1384\text{ cm}^{-1}$  处为  $\text{Ti-O-Fe}$  桥氧结构的  $\text{Fe-O}$  振动吸收峰, 由此可见复合催化剂中  $\text{Fe}^{3+}$  部分取代了  $\text{Ti-O-Ti}$  网络中的  $\text{Ti}^{4+}$  离子, 形成了  $\text{Ti-O-Fe}$  桥氧结构[14];  $\text{TiO}_2$  在  $561\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是  $\text{TiO}_2$  晶体和表面  $\text{Ti-O}$  键伸缩振动所致[15];  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 复合材料在  $518\text{ cm}^{-1}$  处为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  中  $\text{Fe-O}$  振动的吸收峰。

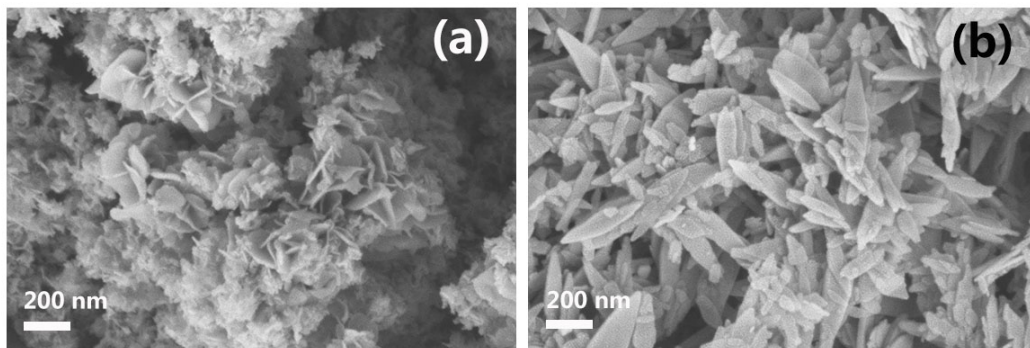
图 4 为  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料的 XRD 图。从图中可知, XRD 衍射峰呈现三套特征峰, 分别为锐钛矿  $\text{TiO}_2$  (JCPDS No.:084-1286), 金红石  $\text{TiO}_2$  (JCPDS No.:087-0710)和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (JCPDS No.:075-0449)。由图可知, 相比  $200^\circ\text{C}$  获得的  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200 样品,  $160^\circ\text{C}$  获得的  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 样品呈现出更加明显的锐钛矿特征峰, 表明  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 样品中的锐钛矿  $\text{TiO}_2$  含量高于  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200 样品。事实上,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200 样品呈现出明显的金红石  $\text{TiO}_2$  特征峰, 故其样品含有更多的金红石  $\text{TiO}_2$ 。

图 5 为  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 和  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200 复合材料的 SEM 图。当水热反应温度为  $160^\circ\text{C}$  时,  $\text{TiO}_2$  的



**Figure 4.** XRD pattern of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  composites. (a)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160; (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200

**图 4.**  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料的 XRD 图。(a)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160; (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200



**Figure 5.** SEM of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  composites. (a)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160; (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200

**图 5.**  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料的 SEM 图 (a)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160; (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200

形貌为花瓣片状(尺寸约为 200 nm),  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  为颗粒状。水热温度为 200℃ 时,  $\text{TiO}_2$  表现为梭形片状晶体(尺寸约为 200 nm), 颗粒状  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  分散在  $\text{TiO}_2$  梭形片状晶体表面。

材料的比表面积对光催化反应的性能有着重要的影响, 图 6 是  $\text{Ti}/\text{Fe}=3:1$ 、反应温度为 160℃、200℃ 的复合材料的氮气吸附-脱吸曲线和孔径分布曲线。由图 6 可知, 反应温度为 160℃ 和 200℃ 的  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料的 BET 比表面积分别为 196.637  $\text{m}^2/\text{g}$ 、67.829  $\text{m}^2/\text{g}$ 。数据表明, 反应温度为 160℃ 的  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料比表面积较大, 而较大的比表面积不仅可以提供有机物降解反应的活性位点, 也可以有效地促进电子空穴对的分离。因此, 当  $\text{Ti}/\text{Fe}=3:1$  时, 反应温度 160℃ 制备的复合材料光催化性能高于 200℃ 制备的复合材料。

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料的织构性能, 如表 1 所示。

由图 6(b) 可知, 水热合成温度为 160℃ 和 200℃ 复合材料的平均孔径分别为 51.56 Å(属于介孔)、163.02 Å(属于大孔)。结合 SEM 的表征结果可知, 大孔为片状晶体堆积的缝隙。图 6(a) 表明水热合成温度为 160℃ 复合材料的氮气相对压力  $P/P_0$  在 0.6~1.0 之间出现明显的滞后现象, 而在 200℃ 下合成的复合材料的滞后现象不明显, 说明了大量孔隙结构的存在于水热合成温度为 160℃ 的复合材料, 从而证明了此温度下合成的复合材料的光催化效果更好。

### 3.3. 光催化性能

图 7(a)为不同水热合成温度制备的  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合光催化剂在太阳光下降解罗丹明 B。图 7(b)为不同水热合成温度制备的  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合光催化剂在紫外光下降解罗丹明 B 的动力学图。再结合相应的光催化动力学方程，复合材料的水热合成温度会对罗丹明 B 的降解产生影响。由表观速率常数  $k$  可以看出，无论是紫外光照射，还是太阳光照射下，水热合成温度为  $160^\circ\text{C}$  的复合材料的  $k$  值均大于水热合成温度为  $200^\circ\text{C}$  的复合材料，因此水热合成温度为  $160^\circ\text{C}$  的复合材料的光催化降解效果优于水热合成温度为  $200^\circ\text{C}$  的复合材料，表现出较高的催化活性。

图 8 为  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料在紫外光催化下降解罗丹明 B 的紫外扫描全谱图。由图可知，罗丹明 B

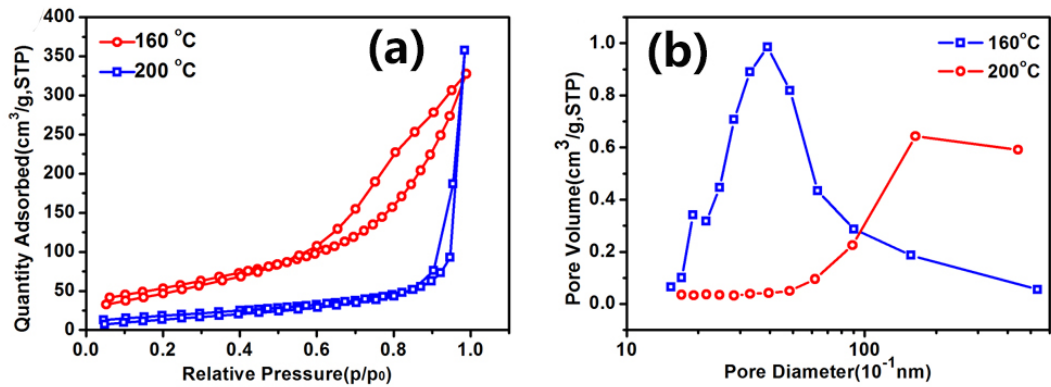


Figure 6.  $\text{N}_2$  adsorption-desorption curves (a) and pore size distribution (b) of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  composites. (a)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160; (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200

图 6.  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料的氮气吸-脱附吸附曲线(a)和孔径分布图(b)。样品为： $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 和  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200

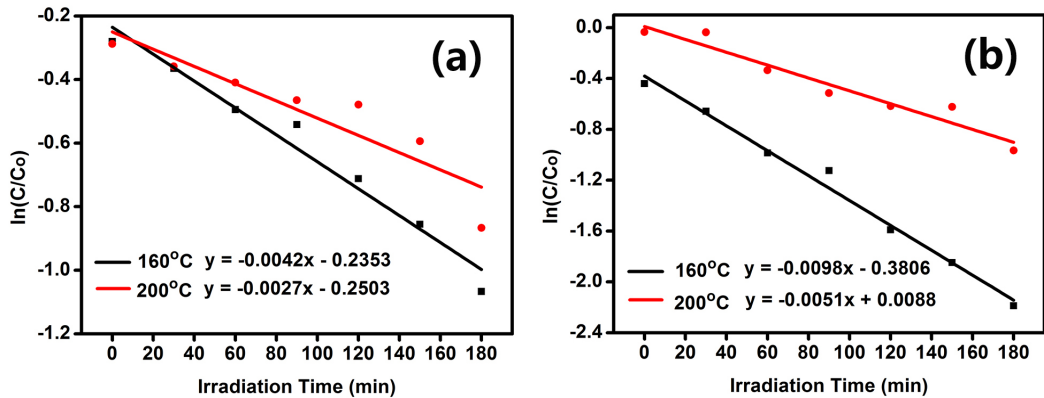


Figure 7. Catalytic kinetics of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 and  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200 composites under sun light (a) and UV light (b)

图 7.  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 和  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200 复合材料的太阳光(a)和紫外光(b)催化的动力学图

Table 1. Textural properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  composites.

表 1.  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料的织构性能

样品	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2/\text{g})$	平均孔径/ $\text{\AA}$	比空容/ $(\text{cm}^3/\text{g})$
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160	196.63	163.02	0.55
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -200	67.83	51.56	0.51

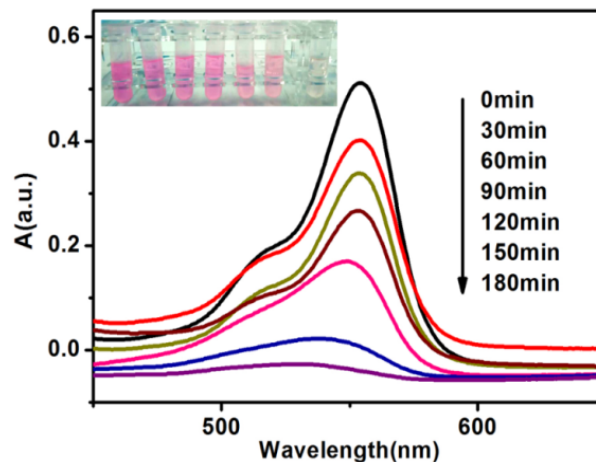


Figure 8. UV-Vis absorption spectra of RhB solution catalyzed by  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 under UV-Vis light

图 8.  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 紫外光催化降解罗丹明 B 溶液的紫外可见吸收光谱图

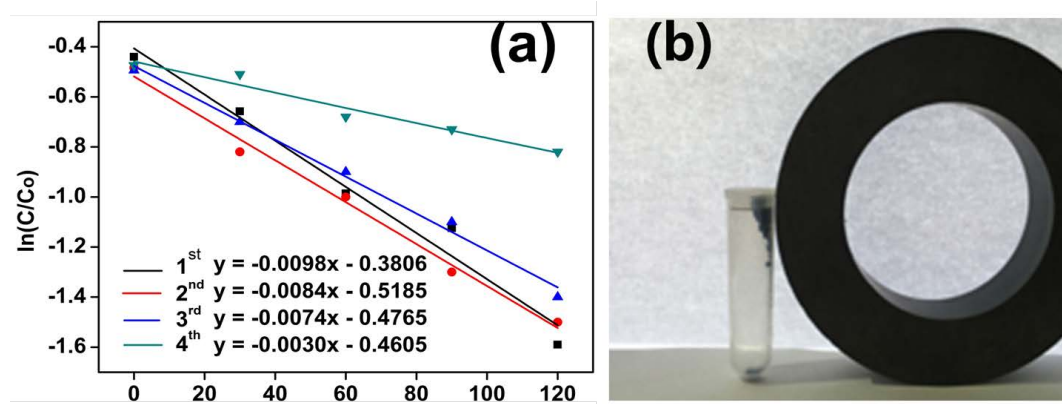


Figure 9. Recycle of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 catalyst under UV-Vis light (a) and magnetic effect (b)

图 9.  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -160 紫外光条件下的催化剂回收利用(a)和磁性效果图(b)

在 551 nm 处有紫外最大吸收。且随着时间的推移，罗丹明 B 的吸光度随之下降，根据吸光度与浓度之间存在线性关系，也就表明罗丹明 B 的浓度随光照时间的延长而逐渐降低。故  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料对罗丹明 B 有光催化降解的作用。

### 3.4. 磁性光催化剂回收利用

图 9 表明，该材料经过四次反复使用仍有较好的光催化降解效果。复合材料经磁铁吸附沉降，倾析分离后回收率较高，具有易于回收、可重复使用的特点。但在催化剂回收使用第四次后，回收率明显下降，因此催化剂最多可回收套用三次。

## 4. 结论

论文从提升天然钛铁矿的利用率出发，将获得的锐钛矿二氧化钛和单质铁通过水热法合成磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  复合材料。在可见光和紫外光条件下， $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  表现出较好的光催化降解罗丹明 B 染料的性能，且可通过外加磁场方便快捷的回收利用复合材料。

## 基金项目

感谢国家自然科学基金(21503092)、国家大学生创新训练项目(201510354009)和嘉兴学院 SRT 项目(SRT2016C113)的资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘守新, 刘鸿. 光催化及光电催化基础与应用[M]. 城市: 化学工业出版社, 2007: 1-3.
- [2] 张剑琦, 李莉, 柳迪, 等. 3DOM TiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 复合材料制备与多模式光催化降解有机污染物[J]. 分子催化, 2015, 29(4): 348-358.
- [3] Fujishima, A., Rao, T.N. and Tryk, D.A. (2000) Titanium Dioxide Photocatalysis. *Journal of Photochemistry & Photobiology C Photochemistry Reviews*, **1**, 1-21. [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(00\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(00)00002-2)
- [4] 叶少博, 卫芝贤. 磁性光催化剂去除有机物的研究进展[J]. 化工新型材料, 2013, 41(10): 187-189.
- [5] Xin, T., Ma, M., Zhang, H., *et al.* (2014) A Facile Approach for the Synthesis of Magnetic Separable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@TiO<sub>2</sub>, Core-Shell Nanocomposites as Highly Recyclable Photocatalysts. *Applied Surface Science*, **288**, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.108>
- [6] Liu, H., Zeng, P., Ji, S., *et al.* (2010) Synthesis of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Magnetic Microspheres and Their Properties of Photocatalytic Degradation Dye stuff. *6th International Conference on Environmental Catalysis*, 229-229.
- [7] He, Q., Zhang, Z., Xiong, J., *et al.* (2008) A Novel Biomaterial—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:TiO<sub>2</sub>, Core-Shell Nano Particle with Magnetic Performance and High Visible Light Photocatalytic Activity. *Optical Materials*, **31**, 380-384.
- [8] Rao, B.P. (2014) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> Core/Shell Nanocubes: Single-Batch Surfactantless Synthesis, Characterization and Efficient Catalysts for Methylene Blue Degradation. *Ceramics International*, **40**, 11177-11186. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.03.148>
- [9] Li, C., Younesi, R., Cai, Y., *et al.* (2014) Photocatalytic and Antibacterial Properties of Au-Decorated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@mTiO<sub>2</sub>, Core-Shell Microspheres. *Applied Catalysis B Environmental*, **156-157**, 314-322.
- [10] 李新海, 伍凌, 王志兴, 等. 综合利用钛铁矿制备二氧化钛、钛酸锂和磷酸铁锂[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2697-2708.
- [11] 张明. 用攀枝花钛铁矿制备球形二氧化钛[J]. 湿法冶金, 2013, 32(5): 336-339.
- [12] 张茜芸, 仲兆平, 姚杰, 等. 由钛铁矿制备 SCR 催化剂载 TiO<sub>2</sub> 的优化试验[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(2): 26-30.
- [13] 郑琦, 陈恒初, 王靖宇, 等. 铁掺杂纳米二氧化钛溶胶的制备及性能研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(4): 14-15.
- [14] Jin, H., Wen, L.I., Xiang, J., *et al.* (2001) Nanometer Particles of Fe<sup>3+</sup>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Complex: Synthesis and Usefulness in Photocatalytic Degradation of Nitrite. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, **18**, 636-639.
- [15] Sivakumar, S., Pillai, P.K., Mukundan, P., *et al.* (2002) Sol-Gel Synthesis of Nanosized Anatase from Titanyl Sulfate. *Materials Letters*, **57**, 330-335. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00786-3)



**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[japc@hanspub.org](mailto:japc@hanspub.org)