

钒钛材料与应用

光催化功能 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的制备 及其光降解特性

李 榕, 贾悦发, 甄 强, 布乃敬, 伍 军

(上海大学纳米科学与技术研究中心, 上海 200444)

摘 要: 以九水硝酸铁和硫酸钛为原料, 利用共沉淀法合成了 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 混合粉体。粉体压制成型的素坯经过高温烧结制备 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷。通过 XRD、SEM 分析 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 多孔陶瓷的物相和微观结构, 并通过对甲基蓝溶液 (浓度为 25 mg/L) 的降解研究其光催化性能和循环使用性能。结果表明: 紫外和可见光条件下, 该陶瓷第一次使用时对甲基蓝溶液的最大降解率分别是 80% 和 94%, 循环使用三次后, 最大降解率分别仅下降 16% 和 17%。所制备的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷具有良好的光催化性能和循环使用性能, 且利于收集, 可以广泛应用于污水处理。

关键词: $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷; 光催化; 循环使用性能; 降解率

中图分类号: TF823, TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2015)01-0026-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2015.01.005

Preparation and Photodegradation of Photocatalytic Functional $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ Ceramics

Li Rong, Jia Yuefa, Zhen Qiang, Bu Naijing, Wu Jun

(Research Center of Nano Science and Technology, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Using iron nitrate nonahydrate ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) and titanium sulfate ($\text{Ti}(\text{SO}_4)_2$) as raw materials, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ mixed powders were synthesized by co-precipitation method. The green cylinders were formed under axial-pressure and sintered at high temperature to obtain the $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics. Phase and microstructure of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ porous ceramics were analyzed by XRD and SEM. The photocatalytic and recyclable performances of the ceramics material in the degradation of methyl blue (MB: 25 mg/L) were studied. The results indicate that after the first time of catalysis about 80% and 94% of MB is degraded with $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics respectively under the ultraviolet and visible (UV/vis) light, after three times of recycles the maximum degradation rate of MB by $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics only reduces by 16% and 17% under the ultraviolet and UV/Vis light, respectively. The $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ porous ceramics shows a good photocatalytic and recyclable performance, which is suggested to be a promising new photocatalysts widely used in the pollutant water treatment.

Key words: $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics, photocatalytic, recycling performance, degradation rate

收稿日期: 2014-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51272154); 上海大学创新基金项目(sdcx2012033); 上海市高校青年教师培养资助计划项目; 上海市教委上海高校教师产学研践习计划。

作者简介: 李 榕(1981—), 女, 上海人, 讲师, 博士, 主要从事先进功能材料研究, 邮箱: li-rong@shu.edu.cn; 通讯作者: 甄强, E-mail: qzhen@staff.shu.edu.cn.

0 引言

TiO_2 因其催化活性高、化学性质稳定、难溶、无毒、成本低而成为应用广泛的光催化剂^[1]。但 TiO_2 的禁带宽度为 3.2 eV, 对太阳光的光能仅吸收约 3%~4%, 研究者通常采用掺杂或者半导体复合的方式, 对 TiO_2 材料进行改性, 从而提高光催化剂的光催化效率, 扩展光催化剂的光吸收范围^[2-3]。 Fe_2O_3 的禁带宽度为 2.2 eV, 可吸收可见光, 但通常光催化活性不高, 与 TiO_2 复合后的光催化剂不仅在可见光区具有较强的吸收度, 而且兼有掺杂过渡金属减小能隙宽度^[4-5]等特性。 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合光催化剂通常用于油污废水、农药废水、造纸废水和染料废水等污水处理。Astam K. Patra^[6] 和 Wei Zhou^[7] 分别探索了 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合光催化剂对制药废水中卤代物及化工废水中亚砷酸盐的催化降解作用。Qiong Sun^[8] 等研究了 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合光催化剂对水中苯酚的催化降解性能, 发现 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合光催化剂的催化苯酚的效果比纯 TiO_2 更好。B. Palanisamy^[9] 等合成了介孔 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合光催化剂, 当复合光催化剂中 Fe_2O_3 的质量分数为 30% 时, 其催化降解 4-氯酚的效果比纯介孔 TiO_2 好。彭绍琴^[10] 等合成的包覆型 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合光催化剂中 Fe_2O_3 质量分数为 45%, 紫外光照下对甲基橙的最大降解率达到 72%。Wei Zhou^[7] 等研究了介孔 $\text{TiO}_2/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 双功能复合材料光催化亚砷酸盐污染物, 分别研究了 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 含量为 30%、50%、70% 时对光催化效果的影响, 发现含 50% Fe_2O_3 的复合光催化剂催化效果较好。研究表明当 Fe_2O_3 含量增加时, 在一定温度下 Fe^{3+} 扩散到 TiO_2 晶格中, 会促进 TiO_2 的晶粒尺寸的增加以及向金红石相转变, 降低了材料的光催化性能; 而当 Fe_2O_3 含量较低时, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合光催化剂对可见光的吸收力降低, 会限制其使用的时间范围。

目前处理工农业废水多使用磁性复合光催化剂或者悬浮型光催化剂, 磁性复合光催化剂在循环利用过程中易于分离, 但是磁性分离使用范围较窄, 不能运用于大规模的处理污水, 而且分离效果不明显, 易造成催化剂的损失, 增加了污水处理成本。而在悬浮体系中催化剂的分离问题一直是限制光催化技术应用的主要因素之一。解决这一问题的主要手段是在载体上固载 TiO_2 膜, 但是制得的膜存在催化性能不高、易断裂、易脱落的问题。

针对磁性、悬浮型复合光催化剂在大规模处理工农业废水中的收集困难和薄膜型催化剂易断裂等问题, 本试验通过共沉淀法合成 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合粉体, 经压制成型后烧结制备 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 多孔陶瓷, 分析其物相、微观结构和物理性能, 并通过甲基蓝的降解试验研究该陶瓷材料的光催化性能以及其循环使用性能。

1 试验条件与方法

1.1 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体和陶瓷的制备

称取一定量的硝酸铁和硫酸钛, 加入乙醇和含有少量稀硫酸的溶液中, 搅拌, 使其混合均匀呈透明溶液。向溶液中滴加氨水作为沉淀剂, 得到的沉淀经去离子水和乙醇洗涤数次, 抽滤后, 沉淀物干燥后, 研磨成细粉, 最后在空气气氛中焙烧 6 h, 可得到红色 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合粉体。

$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合粉体在 8 MPa 轴向压强下压制成圆柱坯体 ($\varnothing = 10 \text{ mm}$; $H = 10 \sim 12 \text{ mm}$), 素坯烘干后经高温烧结制备得到 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷。

1.2 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷光催化试验

将 4 个 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷放入石英试管, 加入 40 mL 浓度为 25 mg/L 的甲基蓝溶液, 分别在紫外 (UV) / 可见光 (Vis) 下进行光催化降解, 每隔 30 min 抽取甲基蓝溶液, 离心后用 0.2 μm 过滤头取上清液并测试吸光度。

$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷循环性能试验步骤: 其他条件同上, 不同之处在于每次光催化试验结束后, 将使用过的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷于 100 $^\circ\text{C}$ 下干燥 6 h, 再进行下一次光催化循环试验, 共循环 3 次。

日本某企业 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷产品粉体与所制备的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷样品粉体对甲基蓝溶液的光催化步骤: 其他条件同上, 不同之处将两种陶瓷粉体各 0.07 g 加入 70 mL 甲基蓝溶液中, 黑暗条件下搅拌 30 min 以达到吸附平衡, 超声 10 min。

甲基蓝溶液的降解率计算公式:

$$D = (A_0 - A_t) / A_t \times 100\% \quad (1)$$

式中, D 为甲基蓝的降解率; A_0 为 0 时刻甲基蓝溶液吸光度; A_t 为 t 时刻甲基蓝溶液吸光度。

1.3 样品的表征

用 D/Max 2200 型 X 射线衍射仪分析 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的物相组成; 使用 200CX 型透射电子显微镜测试 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体的粒度大小; 用 U3010 型紫外分光光度计测试降解后

甲基蓝溶液的吸光度以及 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的 UV-Vis 吸收光谱; 通过 JSM-6700F 发射扫描电子显微镜分析 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的微观形貌; $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的抗压强度采用 GB/T1964—1996 试验测试方法进行, 利用德国 ZWICK-Z050 型电子万能材料试验机进行测试, 样品为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱体, 上下面保持平行, 加载速度 1.5 MPa/s 。

用 GB/T 1966—1996 多孔陶瓷材料的气孔率和体积密度试验测试其体积密度和显气孔率。

$$\text{显气孔率: } P_a = \frac{m_2 - m_0}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{体积密度: } \rho_b = \frac{m_0 \cdot \rho_1}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中 m_0 为试样的干重 g ; m_1 为试样的水中质量 g ; m_2 为试样的湿重 g ; ρ_1 为介质的密度, 这里指水的密度 g/cm^3 。

2 结果与讨论

2.1 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体、陶瓷的物相和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体 SEM

图 1 给出了焙烧后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体和烧结后陶瓷的 XRD 图谱。粉体主要物相为锐钛矿 TiO_2 和 α 型 Fe_2O_3 , 说明 Fe_2O_3 和 TiO_2 之间仅是混合, 未形成新的化合物。经烧结后的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的主要物相为 TiO_2 的金红石相和 Fe_2TiO_5 的板钛矿相。在较高温度条件下 TiO_2 会从锐钛矿相向金红石相转变, 因此烧结后的陶瓷中 TiO_2 以金红石相存在, 同时在升温过程中, Fe_2O_3 和 TiO_2 反应生成了板钛矿相的 Fe_2TiO_5 。

焙烧后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体的 TEM 分布如图 2 所示。由图 2 可见混合粉体的颗粒尺寸主要分布在 $50 \sim 100 \text{ nm}$, 部分颗粒尺寸较大的原因是分散不均匀, 有团聚产生。

2.2 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷和锐钛矿型 TiO_2 的 UV-Vis 吸收光谱

图 3 是烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷和锐钛矿型 TiO_2 的 UV-Vis 吸收光谱。由图 3 可以看出 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷在不同的波段对光都有不同程度的吸收。锐钛矿型 TiO_2 对光的吸收范围为 $320 \sim 400 \text{ nm}$, 主要集中在紫外区域, 对波长超过 400 nm 的可见光几乎没有吸收, 但 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的吸收光谱范围相比锐钛矿型 TiO_2 有所扩大, 在 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 可见光范围内均有吸收。 Fe^{3+} 的进入使 TiO_2 价带位置向上移动, 而

导带位置不变, 从而使 TiO_2 的禁带宽度变窄^[11-12], 因此 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷光吸收曲线的吸收带边相比锐钛矿型 TiO_2 发生了明显红移, 其在 $200 \sim 800 \text{ nm}$ 范围的紫外光区及可见光区均有较强的光吸收。

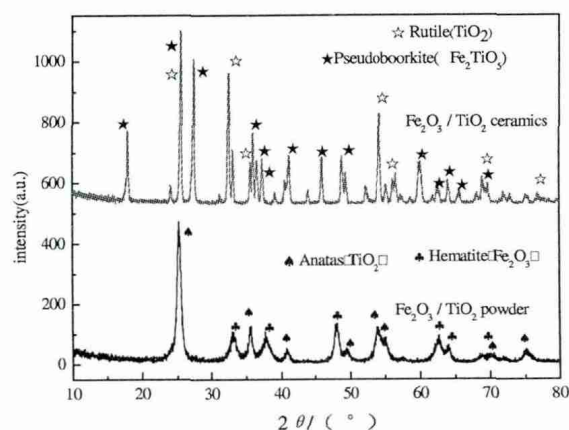


图 1 焙烧后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体和烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的 XRD

Fig. 1 The XRD patterns of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ powders after calcination and $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics after sintering

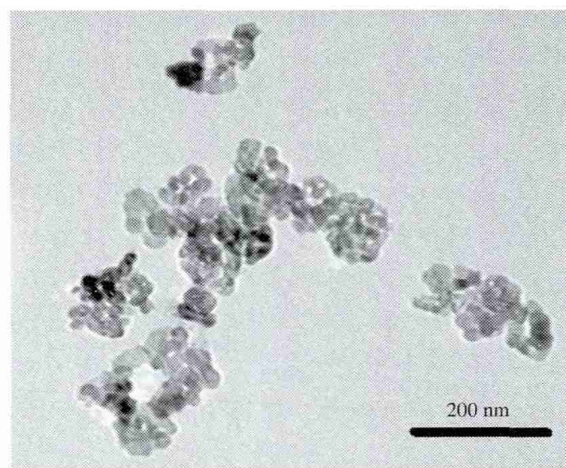


图 2 焙烧后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 粉体的 TEM

Fig. 2 TEM of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ powders after calcination

2.3 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的物理性能和 SEM

烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷样品及其 SEM 见图 4 (a)、(b), 可见烧结后的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷中有微孔分布, 微孔的作用是增大了与污染物的接触面积, 同时形成了污染物的进出通道, 有利于光催化反应的进行。 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷中的颗粒大小在 $1 \mu\text{m}$ 左右, 与原料相比, 颗粒明显增大, 主要原因在于烧结促进了晶粒的生长。 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的体积密度为 2.64 g/cm^3 , 显气孔率为 38.22% 。采用 GB/

T1964-1996 试验测试方法测得 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的常温抗压强度 $11 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$, 其抗压强度高, 有利于 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的循环利用和回收, 减少光催化剂的流失, 保证其大规模循环使用。

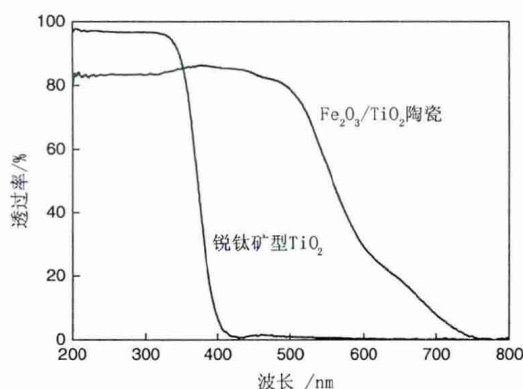


图 3 烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷和锐钛矿型 TiO_2 的 UV-Vis 吸收光谱

Fig. 3 The UV-Vis absorption spectra of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics after sintering and anatase TiO_2

2.4 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的光催化循环性能

图 5(a) 为烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷在 UV 条件下, 第 1 次降解后甲基蓝溶液(浓度为 25 mg/L) 的吸光度曲线。可以观察到随着光照时间的增加, 降解后甲基蓝溶液的吸光度逐渐减小, 原因是: 甲基蓝溶液被光催化降解, 其浓度降低。图 5(b) 为

$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷循环使用 3 次对甲基蓝溶液的降解率。随着循环次数的增加, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷的催化性能降低; 第一次使用其 180 min 最大降解率达到 80%, 当循环 3 次时, 其 180 min 最大降解率相对于第一次降低了 16%, 说明所制备的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷可以循环使用。图 5(c)、(d) 为 Vis 条件下, 烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷第 1 次降解后甲基蓝溶液(浓度为 25 mg/L) 的吸收光谱和循环使用三次对甲基蓝的降解率。随着循环次数增加, 对甲基蓝的降解率趋势变化同紫外光条件。第一次使用对甲基蓝的最大降解率为 94%, 循环 3 次后, 其降解率相对于第一次仅降低 17%, 而降解率仍能高于 70%。与 UV 条件相比, Vis 条件下降解率较高的可能原因有: 紫外光照强度太弱以及 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷对 Vis 具有较大的吸收度。UV/Vis 条件下, 循环使用造成 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷光催化性能降低的可能原因有以下 2 个方面: ①光催化反应过程中, 虽然 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷具有一定的抗压强度, 但是, 与甲基蓝溶液反应过程中, 仍有少量 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷表面的粉体流失; ②光催化过程中, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷表面吸附了一定量的中间产物, 占据了一定量的活性位点, 导致重复使用时活性位点数量降低; 同时, 催化反应结束后的烘干处理, 不能完全去除残留于 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷表面的催化产物, 再次使用时, 减小了 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷与污染物的接触面积。

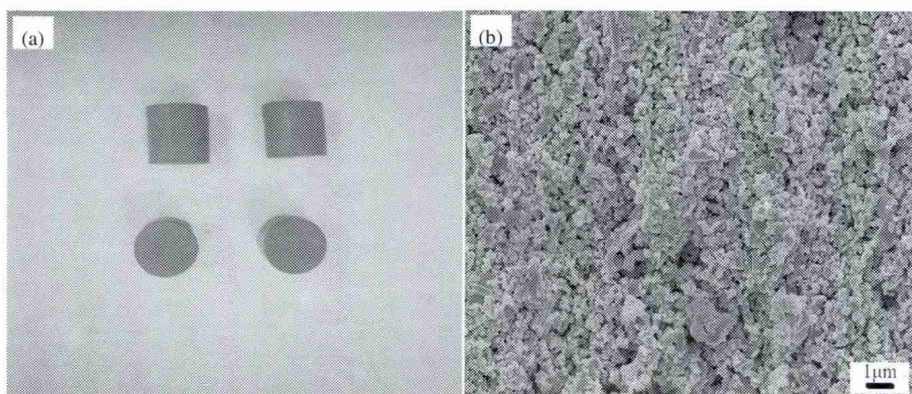


图 4 烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷样品(a) 及其 SEM(b)

Fig. 4 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics after sintering (a) and its SEM image (b)

图 6 为 Vis 条件下, 烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷降解甲基蓝溶液(浓度为 25 mg/L) 0 min 和 30 min 的颜色变化; 当降解时间为 30 min 时, 溶液基本变为透明, 说明甲基蓝被大量降解。

图 7 为 Vis 条件下, 日本某企业 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷产品粉体与烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷样品粉体对甲基蓝溶液(浓度为 25 mg/L) 的降解率, 可见所制备的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷样品粉体对甲基蓝

溶液的降解率明显高于日本某企业 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷产品粉体,其 180 min 的最大降解率相对于

日本某企业 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷产品粉体提高了 5%。

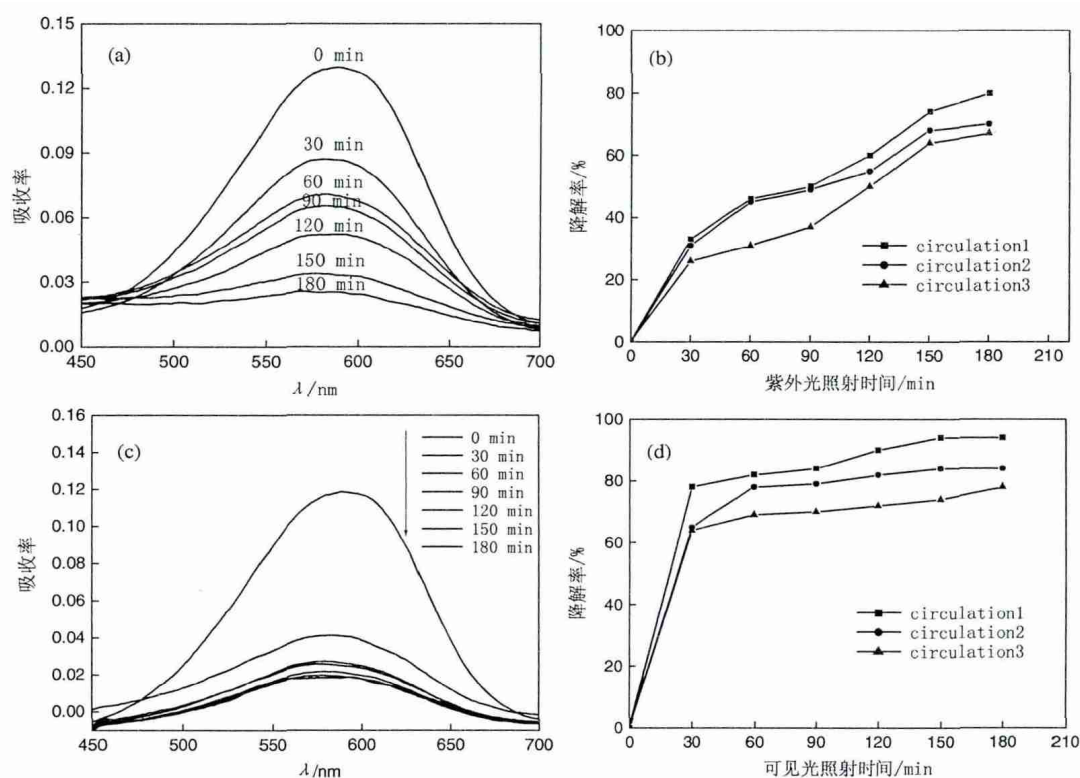


图5 第1次降解后甲基蓝溶液吸收光谱(a,c)和3次循环中降解甲基蓝的降解率(b,d)

Fig.5 The absorption spectrum of methyl blue solution after first time of degradation (a, c) under UV/Vis condition degradation rate of methyl blue solution after 3 recycles (b, d)

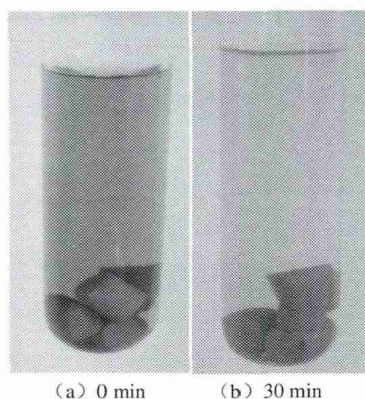


图6 Vis条件下,烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷降解甲基蓝溶液(浓度为 25 mg/L) 0 min 和 30 min 的颜色变化

Fig.6 The color change of methyl blue solution (concentration of 25 mg/L) degraded by $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics after sintering under Vis condition

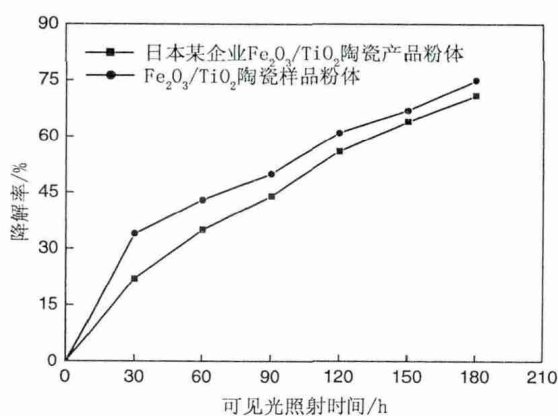


图7 Vis条件下,日本某企业 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷产品粉体与烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷样品粉体对甲基蓝溶液(浓度为 25 mg/L) 的降解率对比

Fig.7 The comparison of degradation rates of methyl blue solution(25 mg/L) by $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics from a Japanese enterprise and the $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ceramics after sintering in this paper under Vis condition

3 结论

1) 以硝酸铁和硫酸钛为原料, 利用共沉淀法合成了 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合粉体, 粉体压制成型的素坯经过烧结后制备 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷, 其在 200 ~ 800 nm 范围的紫外光区及可见光区均有较强的光吸收。

2) 经烧结后的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷具有微孔结构, 其体积密度、显气孔率和常温抗压强度分别为 2.64 g/cm³、38.22% 和 11×10^3 kN/m²。

3) UV 条件下, 烧结后 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷第一次对甲基蓝溶液 (25 mg/L) 的最大降解率为 80%, 循环使用三次后其最大降解率相对于第一次仅降低了 16%。Vis 条件下, 对甲基蓝溶液的最大降解率为 94%, 循环 3 次后, 其降解率相对于与第一次仅降低 17%。且 3 次循环使用后的最大降解率均高于 65%, 因此, 所制备的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷具有良好的光催化和循环使用性能, 并且可以大规模收集。

参考文献

- [1] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode [J]. *Nature*, 1972, 238: 37–38.
- [2] Huogen Yu, Hiroshi Irie, Yoshiki Shimodaira, *et al.* An efficient visible-light-sensitive Fe(III)-grafted TiO_2 photocatalyst [J]. *J. Phys. Chem. C* 2010, 114: 16481–16487.
- [3] Chen Shifu, Yu Xiaoling, Zhang Huaye, *et al.* Preparation and photocatalytic activity evaluation of composite $\text{Fe-TiO}_2/\text{TiO}_2$ photocatalyst [J]. *J. Phys. Chem. C* 2010, 114: 16481–16487.
- [4] Zhu Chunling, Yu Hailong, Zhang Yue, *et al.* $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ tube-like nanostructures: Synthesis, structural transformation and the enhanced sensing properties [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2012, 4: 665–671.
- [5] Yu Yifu, Ren Jiale, Liu Dongsheng, *et al.* Domain-confined multiple collision enhanced catalytic soot combustion over a $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ -nanotube array catalyst prepared by light-assisted cyclic magnetic adsorption [J]. *ACS Catal* 2014, 4: 934–941.
- [6] Astam K Patra, Arghyautta, Asim Bhaumik. Highly ordered mesoporous $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ mixed oxide synthesized by sol-gel pathway: An efficient and reusable heterogeneous catalyst for dehalogenation reaction [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2012, 4: 5022–5028.
- [7] Zhou Wei, Fu Honggang, Pan Kai, *et al.* Mesoporous $\text{TiO}_2/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$: bifunctional composites for effective elimination of arsenite contamination through simultaneous photocatalytic oxidation and adsorption [J]. *J. Phys. Chem. C* 2008, 112: 19584–19589.
- [8] Sun Qiong, Leng Wenhua, Li Zhen, *et al.* Effect of surface Fe_2O_3 clusters on the photocatalytic activity of TiO_2 for phenol degradation in water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 229–230: 224–232.
- [9] Palanisamy B, Babu C M, Sundaravalli B, *et al.* Sol-gel synthesis of mesoporous mixed $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ photocatalyst: Application for degradation of 4-chlorophenol [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2013, 252–253: 233–242.
- [10] Peng Shaoqin, Li Yuexiang, Jiang Fengyi, *et al.* Preparation of composite photocatalyst $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ and its properties [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)* 2004, 4: 26–28.
(彭绍琴, 李越湘, 江凤益, 等. 复合催化剂 $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的制备及其光催化性能 [J]. *有色金属(冶炼部分)* 2004, 4: 26–28.)
- [11] Gong Xiao, Chen Tianhu, Qing Chengsong, *et al.* Preparation and characterization of $\text{TiO}_2/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ photocatalyst [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society* 2008, 36(6): 838–843.
(龚潇, 陈天虎, 庆承松, 等. $\text{TiO}_2/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 复合光催化剂的制备及表征 [J]. *硅酸盐学报* 2008, 36(6): 838–843.)
- [12] Liu Pan, Liu Hong, Zhang Yuanyuan, *et al.* Preparation of magnetic nano- $\text{TiO}_2/\text{NiFe}_2\text{O}_4$ composite material and its photocatalytic properties [J]. *Environmental Pollution & Control* 2009, 31(2): 56–63.
(刘潘, 刘红, 张圆圆, 等. $\text{TiO}_2/\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 磁性纳米光催化剂的制备及其光催化性能研究 [J]. *环境污染与防治* 2009, 31(2): 56–63.)

编辑 余文华

公 告

由《钢铁钒钛》编辑部运营的两个微信公众号 (gtftbjb 和 pzhtgtft) 顺利通过腾讯公司组织的第三方认证, 服务功能更加完善, 敬请关注。