

Performation of Nano-TiO₂ Film with High Photocatalytic Activity

Xingguo Zhao¹, Jinrong Luo², Wanggang Zhang¹, Bin Yu¹, Hongxia Wang^{1*}

¹College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

²Changxin Tianda Environmental Protection Building Materials Co., Ltd., Huzhou Zhejiang

Email: wanghxia1217@163.com

Received: Nov. 4th, 2018; accepted: Nov. 19th, 2018; published: Nov. 26th, 2018

Abstract

In order to degrade environmental pollutants effectively, (Ag,N)-TiO₂ film was prepared on glass substrate by a sol-gel method. The crystal structure, surface morphology and optical properties of the films were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and UV-vis spectrometry (UV-vis). The photocatalytic activity of the film was studied by photocatalytic degradation of methylene blue solution under visible light and the results showed that the films with high crystallinity were composed of anatase phase. The film surface is composed of regular spherical particles with an average grain size of about 20 nm; the film is 150 nm thick and tightly bonded to the glass substrate with no gap between them. The spectral response range of (Ag,N)-TiO₂ film not only extends to the visible region, but also has a higher absorption intensity for visible light. The visible light photocatalytic activity of (Ag,N)-TiO₂ film is better than that of single Ag doping or N doping and pure TiO₂ film. After 300 min illumination under visible light, the degradation rate of methylene blue solution is close to 70%. The reason for this is that noble metal Ag can reduce the recombination rate of photogenerated electron-hole pairs while non-metal N broadens the spectral response range of the film effectively, which improve the photocatalytic activity greatly.

Keywords

(Ag,N)-TiO₂ Film, Visible Light, Photocatalytic Activity

高催化活性银氮共掺纳米TiO₂薄膜的性能研究

赵兴国¹, 罗金荣², 张王刚¹, 余彬¹, 王红霞^{1*}

¹太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原

²长兴天达环保建材有限公司, 浙江 湖州

Email: wanghxia1217@163.com

*通讯作者。

摘要

为了有效降解环境污染物，通过溶胶凝胶法在玻璃基底上制备了(Ag,N)-TiO₂薄膜。采用X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、紫外可见分光光谱仪(UV-vis)对薄膜的晶相结构、表面形貌和光学性能进行了分析。通过可见光下对亚甲基蓝溶液的光催化降解实验研究了薄膜的光催化活性。结果表明：(Ag,N)-TiO₂薄膜的结晶度很高，TiO₂以锐钛矿的形式存在，表面由形状规则的球形颗粒组成，平均晶粒尺寸约为20 nm，并且(Ag,N)-TiO₂薄膜与玻璃基底结合紧密，二者之间无空隙出现，薄膜厚度约为150 nm；(Ag,N)-TiO₂薄膜的光谱响应范围不仅扩展到了可见光区，而且对可见光的吸收强度较高；(Ag,N)-TiO₂薄膜的可见光光催化活性优于单一Ag掺杂、单一N掺杂以及纯TiO₂薄膜的活性。300 min光照后，亚甲基蓝溶液的降解率接近70%，这是由于贵金属Ag可降低光生电子-空穴对的复合率，非金属N能有效拓宽薄膜的光谱响应范围，在二者的共同作用下，薄膜的光催化活性得到了提高。

关键词

(Ag,N)-TiO₂薄膜，可见光，光催化活性

Copyright © 2018 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

TiO₂ 半导体光催化材料以其安全无毒、无污染、稳定性强以及良好的光催化活性等优点，在环境保护、自清洁材料等方面具有广阔的应用前景。以往科研工作者们研究较多的是 TiO₂ 粉体，其最大的缺点是催化反应后不能进行有效地分离，不易回收，而且不能循环利用，容易造成二次污染。随着科研的不断发展，Trapalis. C. C.等[1]研究发现薄膜形式的 TiO₂ 可以附着在不同材料的基底上，并且能够较好地克服粉体的缺点，因此 TiO₂ 薄膜的应用将越来越广。

虽然 TiO₂ 薄膜光催化材料具有光催化活性，能够降解有机污染物，但是由于其禁带宽度较大，不能有效地利用太阳光，而且参与氧化还原反应的光生电子和光生空穴容易复合，极大地限制了其在实际生产生活中的应用。针对 TiO₂ 薄膜光催化材料存在的问题，科研工作者们采用贵金属掺杂、非金属掺杂、共掺杂、半导体复合及染料敏化等方法对其进行改性[2]。贵金属掺杂后，在金属与 TiO₂ 的界面上会形成捕获电子的肖特基势垒(Schottky Barrier)，能够抑制光生电子 - 空穴对的复合，延长载流子的寿命[3]。在众多的贵金属离子(如 Pt⁴⁺、Au³⁺、Ag⁺、Pd²⁺等)中，Ag 因其成本较低、容易制备等优势[4]，成为目前最具潜力的掺杂元素之一。但是 Ag 掺杂只能弥补电子与空穴易复合的缺陷，而未能有效解决 TiO₂ 可见光吸收能力差的难题。针对 TiO₂ 不能有效利用太阳光的问题，任凌等[5]通过掺杂非金属 N 来改性 TiO₂，使得 TiO₂ 的带隙变窄，从而改善了它的吸光性能。因此，金属与非金属共掺杂可以同时克服 TiO₂ 的两大弊端，进一步提高 TiO₂ 的光催化活性，渐渐成为各界人士广泛关注与研究的焦点[6] [7] [8] [9]。顾凌燕等[10]研究了 Ag 和 S 共掺杂的 TiO₂ 催化材料，发现共掺杂能显著提高纳米 TiO₂ 在紫外光及可见光照下的光催化活性。Shen 等[11]考察了 N 和 Ce 共掺杂的 TiO₂ 催化材料，结果表明：共掺杂 TiO₂ 催化材料的光催化活性明显高于相应单一组份掺杂以及未掺杂 TiO₂ 的活性。然而，贵金属 Ag 与非金属 N 共掺杂

TiO₂ 薄膜光催化材料的报道相对较少, 其催化机理仍需进一步研究。本文采用溶胶凝胶法制备了(Ag,N)-TiO₂ 薄膜光催化材料, 通过 XRD、SEM、EDS 以及 UV-vis 表征了催化材料的相组成、微观形貌和光吸收性能, 并以亚甲基蓝溶液为目标污染物, 考察了薄膜在可见光下的光催化活性。

2. 试验材料及方法

2.1. 基底的清洁

首先将尺寸为 25 × 25 × 1 mm 的载玻片放入含有洗洁精的热水中浸泡 30 min, 以去除表面的油污, 然后用流动自来水冲洗, 冲洗完毕后再分别用丙酮和无水乙醇进行超声清洗, 清洗时间均为 15 min, 最后再用二次去离子水将载玻片彻底冲洗干净后吹干备用。

2.2. (Ag,N)-TiO₂ 溶胶的制备

(Ag,N)-TiO₂ 溶胶的制备步骤如下:

1) 室温下用 10 mL 的量筒准确量取 5 mL 钛酸四丁酯, 并将其倒入盛有 20 mL 无水乙醇的锥形瓶中, 再加入 1 mL 乙酰丙酮及 1 mL 二乙醇胺作为抑制剂, 延缓钛酸四丁酯水解, 防止产生白色沉淀。将混合溶液磁力搅拌 90 min 后可得到浅黄色的透明溶液, 记为 A 溶液。

2) 将相当于钛酸四丁酯 0.1 wt% 的硝酸银以及 1.5 wt% 的尿素溶于 4 mL 二次去离子水与 15 mL 无水乙醇的混合溶液中, 再将混合溶液逐滴加入到 A 溶液中, 将溶液 pH 值调至 4~5, 继续搅拌 90 min 后得到混合溶液 B。

3) 为了改善成膜性能, 在 B 溶液中加入一定量的表面活性剂聚乙二醇(PEG-800), 强烈搅拌 60 min 后即可得到所需溶胶, 然后室温下将制备的溶胶陈化 16 h 后备用。

2.3. (Ag,N)-TiO₂ 薄膜的制备

将洗净吹干的玻璃片固定在转速为 1400 r/min 的旋涂机的转盘上, 用滴管把陈化后的(Ag,N)-TiO₂ 溶胶滴到转动的玻璃片上, 从而制得(Ag,N)-TiO₂ 湿膜。然后将湿膜烘干并放入电阻炉中进行热处理, 热处理温度为 400℃, 热处理时间均为 2 h, 升温速率约为 1℃/min, 热处理完毕后即可得到(Ag,N)-TiO₂ 薄膜。

2.4. 薄膜的表征

采用 Rigaku D/max 2500 型 X 射线衍射仪(XRD)分析薄膜的晶相结构, 扫描范围为 20°~70° (2θ); 采用 Tescan Mira 3 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察薄膜的表面形貌, 电压为 10 KV; 采用 756PC 型紫外可见分光光度计(UV-vis)来完成 TiO₂ 薄膜的光吸收性能测试, 测试范围为 300 nm~800 nm。在实验过程中, 以未沉积 TiO₂ 薄膜的空白载玻片的吸光度作为参比, 以消除空白载玻片的光吸收所产生的影响。

2.5. 薄膜的光催化性能测试

本实验通过测量可见光下 TiO₂ 薄膜对亚甲基蓝(MB)溶液的降解速率来评估薄膜的光催化活性。实验过程如下: 在光催化反应之前, 将样品放在盛有 10 mL MB 溶液(5 mg/L)的敞口烧杯中, 黑暗条件下搅拌 2 h 使得催化材料、MB 和水达到吸附-脱附平衡。光催化反应是在室温下进行的, 搅拌完毕后, 采用 300 W 的钨灯(用来模拟可见光)进行照射, 灯管与液面的距离为 10 cm。反应开始后, 间隔一定的时间将溶液吸取至比色皿中, 采用 756PC 的紫外可见分光光度计来测量亚甲基蓝溶液在 664 nm 处的吸光度。这是因为该浓度范围内的亚甲基蓝溶液在 664 nm 处的吸光度值最大, 并且吸光度值与溶液的浓度有较好的线性关系, 也就是说当溶液浓度处于 0~20 mg/L 的范围时, 吸光度 A 与浓度 C 成正比, 即吸光度值越大, 溶液的浓度越高, 吸光度值越小, 溶液的浓度越低。因此, 可以用下式来计算亚甲基蓝(MB)溶液的降解

速率:

$$d = (C_0 - C) / C_0 \times 100\% = (A_0 - A) / A_0 \times 100\%$$

式中 d 为降解率, C_0 为亚甲基蓝溶液光降解前的浓度, C 为光降解后残余亚甲基蓝溶液的浓度, A_0 为亚甲基蓝溶液光降解前的吸光度值, A 为光降解后残余亚甲基蓝溶液的吸光度值。

3. 结果与讨论

3.1. X 射线衍射分析(XRD)

本实验采用完全相同的制备工艺和热处理方法制备了 TiO_2 薄膜和 TiO_2 粉末, 由于 TiO_2 薄膜较薄, 普通 X 射线衍射仪的检测信号较弱, 无法正确检测到薄膜的相结构, 所以本实验用相同条件下制备的 TiO_2 粉末进行 X 射线衍射分析, 以此来获得 TiO_2 薄膜的相成分。

图 1 为经 400°C 热处理制备的(Ag,N)- TiO_2 粉末样品的 X 射线衍射谱图。由图可知, 在本实验的制备条件和热处理工艺下制得的 TiO_2 全部以锐钛矿的形式存在, 即没有出现金红石相, 而且锐钛矿的衍射峰比较尖锐, 说明结晶良好。同时在 XRD 图谱中可以看到 Ag 相的特征衍射峰($2\theta = 38.20^\circ$), 对应于 Ag (111) 晶面, 但是在衍射谱图中没有观察到任何含氮物质的衍射峰, 这可能是由于掺杂的氮元素没有形成新的物质而是高度分散地进入到 TiO_2 的晶格内部。

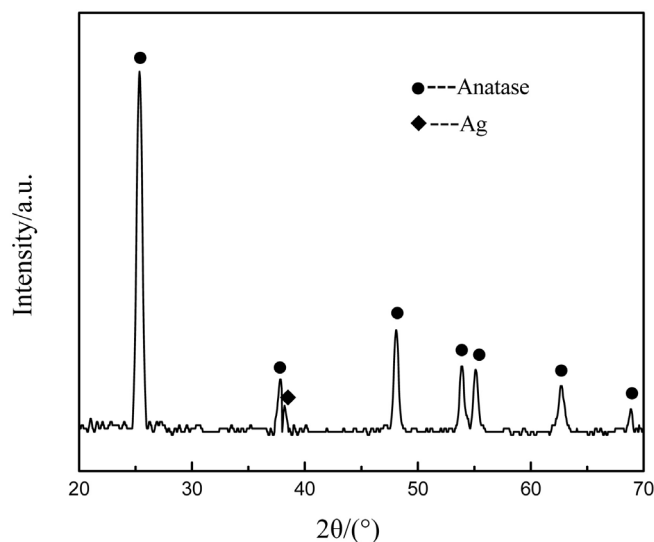


Figure 1. XRD spectra of (Ag,N)- TiO_2 powders calcined at 400°C
图 1. 400°C 热处理的(Ag,N)- TiO_2 粉末样品的 XRD 谱图

3.2. 扫描电子显微镜分析(SEM)

图 2(a)和图 2(b)分别为经 400°C 热处理制备的(Ag,N)- TiO_2 薄膜样品的表面形貌和断面形貌。从图 2(a)中可以清楚地看到, (Ag,N)- TiO_2 薄膜的结晶度很高, 表面由形状规则的球形颗粒组成, 颗粒轮廓非常清晰, 大小均匀, 平均晶粒尺寸约为 20 nm, 另外, 薄膜表面平整致密并且无裂纹出现。由(Ag,N)- TiO_2 薄膜断面的 SEM 照片(见图 2(b))可知, 在本实验条件下制备的薄膜与玻璃基底结合紧密, 二者之间无空隙出现, 薄膜厚度约为 150 nm。

图 3 为(Ag,N)- TiO_2 薄膜经 400°C 热处理后的 EDS 图谱, 由图可知, 除玻璃本身的元素(In, Si)之外, EDS 图谱中还有 Ti、O、Ag、N 元素, 说明 Ag 和 N 元素均已成功地掺入进 TiO_2 薄膜中。

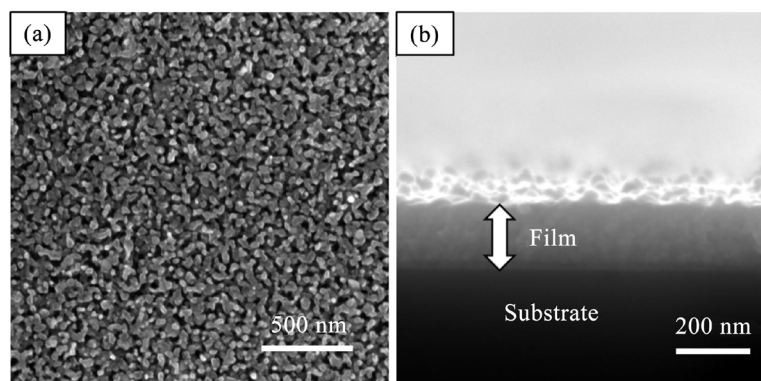


Figure 2. SEM photograph of (Ag,N)-TiO₂ film calcined at 400°C, (a) surface of (Ag,N)-TiO₂ film; (b) cross-section of (Ag,N)-TiO₂ film

图 2. 400°C 热处理的 (Ag,N)-TiO₂ 薄膜的 SEM 照片, (a) (Ag,N)-TiO₂ 薄膜表面; (b) (Ag,N)-TiO₂ 薄膜断面

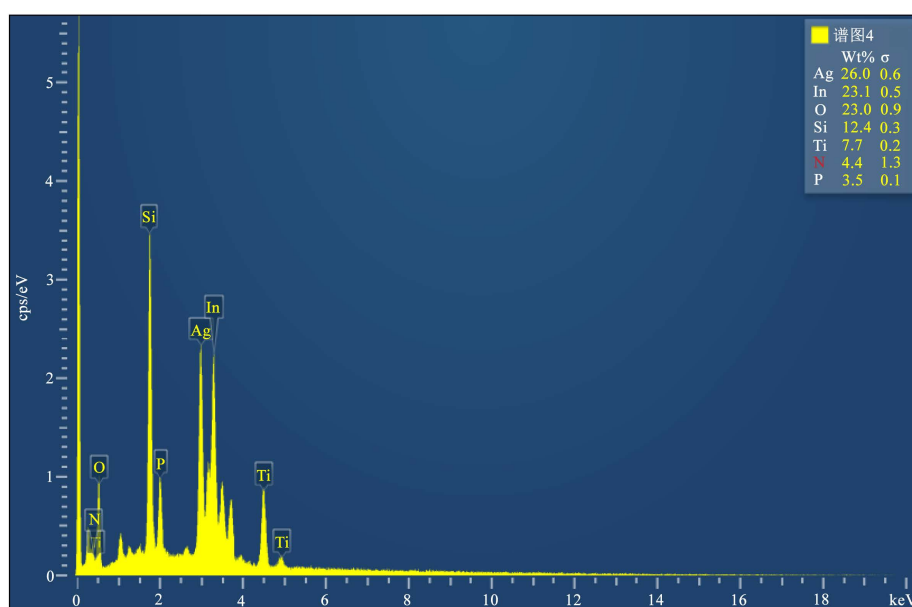


Figure 3. EDS spectra of (Ag,N)-TiO₂ film calcined at 400°C

图 3. 400°C 热处理的 (Ag,N)-TiO₂ 薄膜的 EDS 图谱

3.3. 紫外-可见光光谱分析

图 4 中(a)~(d)分别为纯 TiO₂ 薄膜、Ag-TiO₂ 薄膜、N-TiO₂ 薄膜以及(Ag,N)-TiO₂ 薄膜的紫外可见光吸收图谱。从图中可以看出, 四种薄膜在可见光区吸收强度最强的为(Ag,N)-TiO₂ 薄膜, 其次为 N-TiO₂ 薄膜, 再次是 Ag-TiO₂ 薄膜, 最弱的是纯 TiO₂ 薄膜。因此, 在本实验条件下制备的薄膜中, (Ag,N)-TiO₂ 薄膜的吸光性能是最好的, 光谱响应范围不仅扩展到了可见光区, 而且吸光强度也是最强的。

3.4. 光催化性能分析

图 5 中(a)~(d)分别为纯 TiO₂ 薄膜、Ag-TiO₂ 薄膜、N-TiO₂ 薄膜以及(Ag,N)-TiO₂ 薄膜在可见光下对亚甲基蓝(MB)溶液的光催化降解曲线。由图可知, 纯 TiO₂ 薄膜的光催化活性最低, 亚甲基蓝在可见光下几乎没有降解, 在 TiO₂ 薄膜中掺入 Ag 后, 亚甲基蓝的降解率升高到 45%, 掺入 N 后, 亚甲基蓝的降解率约为 48%, 而对 TiO₂ 薄膜进行银氮共掺后, 可见光下照射 300 min 亚甲基蓝的降解率接近 70%, 同时

观察降解后亚甲基蓝溶液的颜色已由原先的蓝色变为淡蓝色。因此,对 TiO_2 薄膜进行银氮共掺可以明显提高其光催化活性,极大地促进了薄膜对有机污染物的光催化降解。

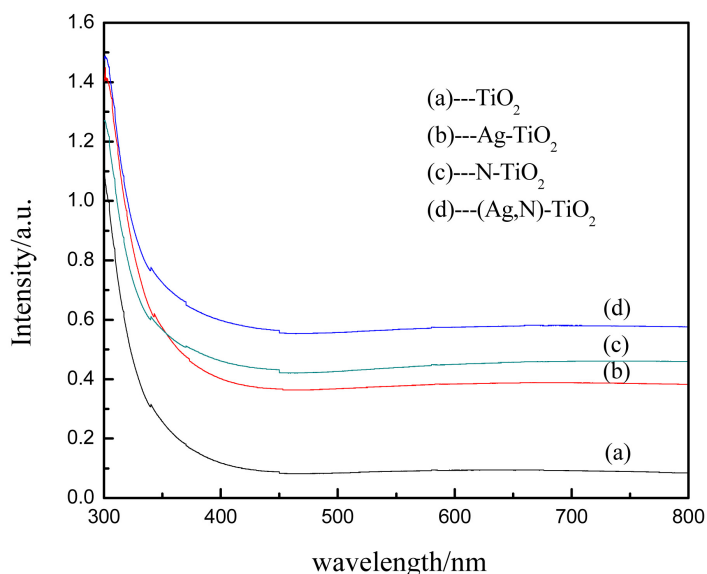


Figure 4. Absorption spectra of film in UV-vis, (a) TiO_2 , (b) Ag-TiO_2 , (c) N-TiO_2 , (d) $(\text{Ag,N})\text{-TiO}_2$
图 4. 薄膜的紫外可见光吸收图谱, (a) TiO_2 , (b) Ag-TiO_2 , (c) N-TiO_2 , (d) $(\text{Ag,N})\text{-TiO}_2$

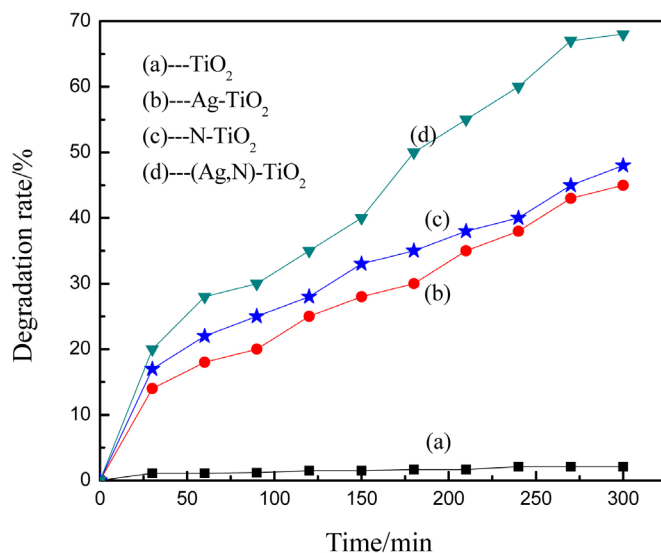


Figure 5. Photocatalytic degradation curves of methylene blue (MB) with films under visible light, (a) TiO_2 , (b) Ag-TiO_2 , (c) N-TiO_2 , (d) $(\text{Ag,N})\text{-TiO}_2$

图 5. 可见光下薄膜对亚甲基蓝(MB)溶液的光催化降解曲线, (a) TiO_2 , (b) Ag-TiO_2 , (c) N-TiO_2 , (d) $(\text{Ag,N})\text{-TiO}_2$

4. 讨论

本文通过对 TiO_2 薄膜进行银氮共掺使薄膜晶粒细化,光谱响应范围扩展至可见光区,且吸收强度较强,其光催化活性高于单一银掺杂、单一氮掺杂以及纯 TiO_2 薄膜的活性,300 min 光照后,亚甲基蓝溶液的降解率接近 70%,分析认为这是由于贵金属 Ag 与非金属 N 共掺杂后产生的共同作用所致。

在 TiO_2 薄膜中掺杂 N, N 会进入 TiO_2 晶格并取代氧原子,因为 N 的电负性比 O 的电负性小, N 的

2p 轨道与 O 的 2p 轨道杂化后可使 TiO₂ 的带隙变窄, 从而扩大了薄膜的光谱响应范围[12]。同时, N 的掺杂也有利于氧空位的形成, 氧空位能够在 TiO₂ 的导带下方形成一个窄的能带, 使 TiO₂ 具有可见光活性[13]。另外, N 进入 TiO₂ 晶格会产生晶格畸变, 从而影响薄膜晶粒的生长, 细化颗粒, 增大比表面积, 提高薄膜的光催化活性[14]。

Ag 掺杂能够降低光生电子和光生空穴的复合几率, 改善 TiO₂ 薄膜的光催化性能, 这是由于贵金属 Ag 的功函数(Φ_m)比 TiO₂ 的功函数(Φ_s)高, 当 Ag 掺杂进 TiO₂ 薄膜中, 电子就会从费米能级较高的 TiO₂ 向费米能级相对较低的金属 Ag 迁移, 这样金属 Ag 表面就会获得较多的电子, 即显示过量的负电荷, 而 TiO₂ 表面带过量的正电荷, TiO₂ 的能带就会向上弯曲, 在 TiO₂ 表面形成耗尽层, 从而在金属 Ag 与 TiO₂ 的界面上形成捕获电子的肖特基势垒(Schottky Barrier), 金属 Ag 便成为捕获激发电子的有效陷阱, 抑制了光生电子与光生空穴的复合, 延长了载流子的寿命, 并且薄膜表面空穴存在时间的延长对于主要通过空穴与空穴载体(羟基·OH)进行的光催化氧化分解反应来说, 其降解速率就得到了一定程度的提高。另外, 从半导体 TiO₂ 迁移至金属 Ag 的光生电子并不发生积累, 而是直接形成漂移电流流走, 从而在薄膜表面的不同位置发生氧化还原反应, 提高薄膜的光催化降解能力。也就是说, 在金属 Ag 与 TiO₂ 界面上形成的肖特基势垒不仅具有促进光生电子-空穴对分离的能力, 而且能够快速把分离的光生电子迁移走, 从而有利于光生空穴参与氧化还原反应[15]。

因此, 对于(Ag,N)-TiO₂ 薄膜来说, 在贵金属 Ag 与非金属 N 的共同作用下, 一方面薄膜的禁带宽度变窄, 使其能够在波长较长的可见光下受到激发而产生光生电子-空穴对, 即拓宽了薄膜的光谱响应范围。另一方面, 掺杂离子能够捕获激发电子, 抑制光生电子-空穴对的复合, 使得更多的光生电子和光生空穴能够参与氧化还原反应。所以说正是在掺杂元素银和氮的共同作用下, TiO₂ 薄膜的光催化活性以及光催化降解污染物的能力得到了极大地提高。

5. 结论

1) 以钛酸四丁酯、硝酸银和尿素为前驱体, 采用溶胶凝胶法结合旋涂法在热处理温度为 400℃ 的条件下成功制备了(Ag,N)-TiO₂ 薄膜光催化材料, 并采用多种测试手段对其晶型结构、微观形貌、光吸收性能进行了分析和研究, 同时以亚甲基蓝溶液为目标污染物, 考察了薄膜在可见光下的光催化活性。

2) (Ag,N)-TiO₂ 薄膜的结晶度很高, TiO₂ 以锐钛矿的形式存在, 表面由形状规则的球形颗粒组成, 平均晶粒尺寸约为 20 nm, 并且(Ag,N)-TiO₂ 薄膜与玻璃基底结合紧密, 二者之间无空隙出现, 薄膜厚度约为 150 nm。(Ag,N)-TiO₂ 薄膜的光谱响应范围不仅扩展到了可见光区, 而且对可见光的吸收强度较高。

3) (Ag,N)-TiO₂ 薄膜的可见光光催化活性优于单一 Ag 掺杂、单一 N 掺杂以及纯 TiO₂ 薄膜的活性, 300 min 光照后, 亚甲基蓝溶液的降解率接近 70%, 亚甲基蓝溶液的颜色由起初的蓝色变为淡蓝色。这是由于贵金属 Ag 可降低光生电子-空穴对的复合率, 非金属 N 能有效拓宽薄膜的光谱响应范围, 在二者的共同作用下, 薄膜的光催化活性得到了很大的提高。

参考文献

- [1] Trapalis, C.C., Keivanidis, P., Kordas, G., *et al.* (2003) TiO₂(Fe³⁺) Nanostructured Thin Film with Antibacterial Properties. *Thin Solid Films*, **433**, 186-190. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00331-6](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00331-6)
- [2] 张莹, 燕宁宁, 朱忠其, 等. Ag-TiO₂ 光催化剂的制备、性能及机理研究[J]. *功能材料*, 2013, 44(2): 172-176.
- [3] 孙怀宇, 房威. Ag-TiO₂ 薄膜的制备与光催化性能研究[J]. *应用化工*, 2014, 43(1): 68-70.
- [4] 李红, 赵高凌, 赵李川, 等. 热处理温度对溶胶-凝胶法制备 Ag/TiO₂ 膜的影响[C]//全国溶胶-凝胶科学技术学术会议: 2007 年卷.
- [5] 任凌, 杨发达, 张渊明, 等. 氮掺杂 TiO₂ 光催化剂的制备及可见光催化性能研究[J]. *无机化学学报*, 2008, 24(4):

541-546.

- [6] 曹广秀, 马淮凌, 姜芳婷, 等. 掺杂 Fe_2O_3 纳米 TiO_2 膜光催化降解有机染料废水中甲基橙[J]. 工业水处理, 2006, 26(12): 44-47.
- [7] 周建军, 崔海萍, 闫军. 无机阴离子掺杂 TiO_2 薄膜光催化性能及红外光谱分析[J]. 信息记录材料, 2006, 7(6): 10-13.
- [8] 许佩瑶, 康玺, 朱洪涛, 等. 掺杂 Fe^{3+} 和 Zn^{2+} 纳米二氧化钛薄膜光催化降解制革废水的试验研究[J]. 中国皮革, 2007, 36(13): 17-20.
- [9] Moon, J., Takagi, H., Fujishiro, Y., *et al.* (2001) Preparation and Characterization of the Sb-Doped TiO_2 Photocatalysts. *Journal of Materials Science*, **36**, 949-955. <https://doi.org/10.1023/A:1004819706292>
- [10] 顾凌燕, 王玉萍, 彭盘英, 等. S 与金属共掺杂 TiO_2 催化剂的制备及其光催化性能[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5): 910-918.
- [11] Shen, X.Z., Liu, Z.C., Xie, S.M., *et al.* (2009) Degradation of Nitrobenzene Using Titania Photocatalyst Co-Doped with Nitrogen and Cerium under Visible Light Illumination. *Journal of Hazardous Materials*, **162**, 1193-1198. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.004>
- [12] 方晓明, 张正国, 陈清林. 具可见光活性的氮掺杂二氧化钛光催化剂[J]. 化学进展, 2007, 19(9): 1282-1290.
- [13] 秦桂容. 不同基材上 N 掺杂 TiO_2 薄膜的制备及光催化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 广西师范大学, 2010.
- [14] 赖彭亮, 朱燕舞, 王均胜, 等. 氮掺杂 TiO_2 的制备及其在不同光源下的光催化性能[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(4): 542-548.
- [15] 廖振华, 陈建军, 姚可夫, 等. 纳米 TiO_2 光催化剂负载化的研究进展[J]. 无机材料学报, 2004, 19(1): 17-24.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ms@hanspub.org