

Pt助剂对N掺杂TiO₂可见光光催化性能的影响

郑华荣, 崔言娟, 张金水, 丁正新, 王心晨

福州大学光催化研究所国家重点实验室培育基地, 福建福州 350002

摘要: 考察了Pt促进的N掺杂TiO₂(Pt/N-TiO₂)催化剂对光催化降解有机污染物性能的影响及其作用本质. 采用X射线衍射、透射电镜、X射线光电子能谱、紫外-可见漫反射光谱、光电化学和荧光光谱等手段对催化剂进行了表征, 并考察了样品在可见光下光催化降解甲基橙(MO)的反应性能. 结果表明, Pt的存在并未明显改变N-TiO₂的晶相和介孔结构, 却增强了催化剂对可见光吸收, 但这种背景吸收不利于光激发中心(N-TiO₂)对可见光的吸收, 从而影响Pt/N-TiO₂光催化活性; 高度分散在N-TiO₂表面的Pt, 显著地改变了催化剂表面电子结构, 从而提高了N-TiO₂的光催化性能.

关键词: 氮掺杂; 二氧化钛; 助剂; 铂; 光催化; 可见光降解

中图分类号: O643/X7

文献标识码: A

Influence of Pt Promoter on the Visible Light Photocatalytic Properties of N-Doped TiO₂

ZHENG Huarong, CUI Yanjuan, ZHANG Jinshui, DING Zhengxin, WANG Xinchen*

State Key Laboratory Breeding Base of Photocatalysis, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian, China

Abstract: The influence of Pt as a promoter on the photocatalytic performance of nitrogen-doped TiO₂ was described. The sample was characterized by X-ray diffraction, transmission electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy, photoelectrochemistry, and photoluminescence. The degradation of methyl orange in aqueous solution under visible light irradiation was used to evaluate the photocatalytic activity of the sample. The modification of N-TiO₂ with Pt did not change the crystal structure and the mesoporous structure of TiO₂. The loading of Pt enhanced the material absorption in visible light region, which is assigned to background absorption that has detrimental effect on photocatalytic activity. However, the highly dispersed Pt on the surface of N-TiO₂ remarkably altered the surface structure (surface state) of N-TiO₂, contributing largely to the enhanced photocatalytic activity of nitrogen-doped TiO₂.

Key words: nitrogen doped; titania; promoter; platinum; photocatalyst; visible light degradation

随着我国经济的高速发展, 环境污染变得日益严重和尖锐^[1,2], 严重制约了我国经济的可持续发展, 同时也威胁着人类身心健康^[3]. 因此, 环境污染的有效控制与治理已成为人们亟待解决的问题之一. 半导体光催化技术可直接利用太阳能分解气相和液相中的有机污染物, 是治理环境污染问题的理想途径之一^[4-7].

TiO₂是一种廉价、易得、无毒和环境友好的无机半导体材料, 也是一种具有重要应用前景的光催

化剂^[7-12]. 但较大的禁带宽度(3.2 eV)使其只对占太阳光3%的紫外光有响应, 不能充分利用太阳光中大量的可见光, 因而严重阻碍了TiO₂的实际应用^[13,14].

近年来, 通过对TiO₂进行各种途径的改性或敏化, 增强其对可见光的响应, 成为光催化领域研究的一个热点和难点^[13]. 与传统的金属/金属氧化物或金属离子掺杂相比, 非金属元素掺杂不仅不会明显降低TiO₂在紫外光区的光催化活性, 而且掺杂过程易于控制, 不会因掺杂浓度的变化引入复合中心, 降低

收稿日期: 2010-07-19. 接收日期: 2010-09-04.

联系人: 王心晨. Tel: (0591)83773729; Fax: (0591)83779105; E-mail: xcwang@fzu.edu.cn

基金来源: 国家自然科学基金(20603007, 21033003); 国家重点基础研究发展计划(973计划, 2007CB613306); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”(PCSIRT0818); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划(XSJRC2007-19).

其光催化活性^[15-18],因而成为主要的掺杂手段.其中 N 掺杂的 TiO₂ 具有较高的可见光响应性能和稳定性,因此,N 掺杂被认为是 TiO₂ 可见光催化的一条有效途径^[19,20].但是,目前 N-TiO₂ 的可见光活性还比较低,研究表明^[20-22],对非金属元素掺杂的 TiO₂ 光催化剂进行各种形式的后处理,可提高其光催化活性.

贵金属 Pt 具有较大的金属功函数(5.65 eV),沉积在催化剂表面,可形成 Schottky 势垒,成为光生电子的捕获中心,促进光催化剂表面光生载流子的分离,因而广泛应用于光催化的研究中^[23,24]. Yu 等^[25]利用光还原法在 TiO₂ 纳米片上沉积 2% Pt,使其光解水产氢的活性从 3.0 μmol/h 提高到 333.5 μmol/h; Li 等^[26,27]则详细地研究了牺牲剂种类和溶液 pH 等反应条件对 Pt/TiO₂ 光催化活性的影响,加深了人们对负载 Pt 光催化剂光催化行为的认识.目前 N-TiO₂ 表面上负载 Pt 的研究,也是当前光催化研究领域的一个热点.华南平等^[28]以三乙胺为氮源,采用光化学还原法制备了 Pt、N 共掺杂的 TiO₂,并考察了其可见光降解三氯乙酸的活性; Li 等^[29]以浓氨水为氮源,采用光化学还原法制备了 Pt/N-TiO₂,并考察了其在 H₂-O₂ 气氛下可见光降解苯系污染物的能力.本课题组发现,将在 NH₃ 中煅烧而制得的 N-TiO₂ 在空气中进行热处理,以去除其表面多余的氧空位和吸附的 NH₃,可大大地提高其可见光降解乙烯的活性和稳定性^[30].基于此,本文对空气中热后处理的 N-TiO₂ 上负载 Pt,考察其液相降解有机污染物的能力,研究了 Pt 负载对催化剂的能带结构及表面态的影响.

1 实验部分

1.1 催化剂的制备

采用改进的溶胶-凝胶法制备无定形的 TiO₂ 干凝胶^[31].将钛酸四丁酯缓慢地滴加到剧烈搅拌的去离子水中,并用硝酸调节其 pH 值为 3~4,再在室温下剧烈搅拌 48 h,得到透明澄清的 TiO₂ 溶胶,在 60 °C 烘干即得无定形的 TiO₂ 干凝胶.将制得的 TiO₂ 干凝胶置于管式炉中煅烧.煅烧条件为: NH₃ 流量 400 ml/min,升温速率 3 °C/min,温度 400 °C,时间 3 h.将煅烧后所得黄色样品在空气中于 300 °C 煅烧 2 h,即得 N-TiO₂.

取 0.1 g N-TiO₂ 分别置于不同用量的氯铂酸溶液中浸渍 2 h,在 100 °C 搅拌蒸干后于空气中 400 °C

煅烧 2 h,即得不同 Pt 负载量的 xPt/N-TiO₂ 样品,其中 x 为 Pt 负载量(例如,x 为 2.0% 时对应的样品是 2.0% Pt/N-TiO₂)

1.2 催化剂的表征

样品的 X 射线衍射(XRD)分析采用 Bruker D 8 Advance 型 X 射线衍射仪(Cu 靶,40 kV,40 mA).样品的光吸收性能(UV-Vis DRS)表征在 Varian Cary 500 Scan 型紫外-可见光谱仪上进行,选用小积分球, Ba₂SO₄ 为参比.采用荷兰 Tecnai 20 FEG 型透射电镜(TEM)观测催化剂的形貌、大小和介孔结构等,其中加速电压为 200 kV. X 射线光电子能谱(XPS)实验在 ESCALAB MK-II 型光电子能谱仪上进行,其中真空度为 3.0 × 10⁻⁸ Pa,采用 Al K_α X-ray(1 486.6 eV).样品的荧光(PL)测试在 Edinburgh Instrument FL/FS920 型荧光光谱仪上进行.光电化学测试在美国 BAS Epsilon 工作站上进行,光源采用北京畅拓 CHF-XM500 氙灯.

1.3 催化剂的评价

光催化反应在自制的间歇式反应装置中进行.可见光由置于双夹层玻璃夹套中的 300 W 卤钨灯产生(夹层内通冷凝水),在光路上放置一组合滤光片(红外滤光片 + 420 nm 滤光片)以保证入射光为可见光(420 nm < λ < 800 nm).玻璃反应瓶的有效容积为 80 ml.通过磁力搅拌来维持溶液中催化剂为悬浮态.

将 40 mg 催化剂加入到 80 ml 甲基橙(MO, 10 mg/L)溶液中,在黑暗处搅拌 2 h,以达到吸脱附平衡.然后开启光源,每隔一定时间移取 3.0 ml 反应液,经离心分离后,取上层清液在 Varian Cary 50 型紫外-可见光谱仪上测其紫外-可见光谱(UV-Vis).

2 结果与讨论

2.1 催化剂的物化性质

图 1 为 N-TiO₂ 和 Pt/N-TiO₂ 样品的 XRD 谱.由图可见,所得样品都为锐钛矿晶相的 TiO₂(JCPDS, 73-1764).根据最强衍射峰,即锐钛矿(101)由 Scherrer 公式估算出 N-TiO₂ 的平均晶粒尺寸为 10 nm.由于 Pt 负载量较低且高度分散于 TiO₂ 表面,因此未出现 Pt 的衍射峰.可以看出随着 Pt 负载量的增加,催化剂晶相结构没有改变,但其结晶度逐渐下降.

图 2 为 N 掺杂前后、Pt 负载前后 TiO₂ 的 UV-Vis 谱.可以看出,N 掺杂使得 TiO₂ 吸收边发生明显红

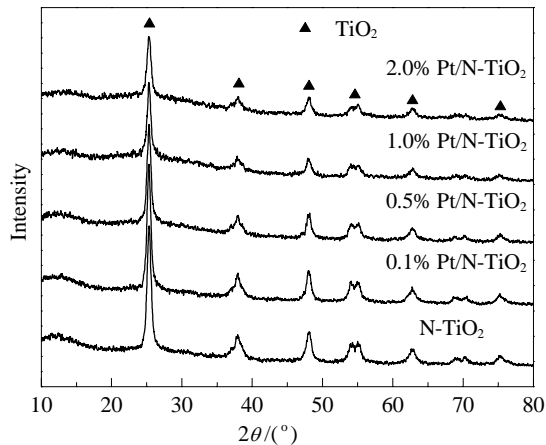


图 1 不同负载量的 Pt/N-TiO₂ 样品的 XRD 谱

Fig. 1. XRD patterns of Pt/N-TiO₂ samples with different Pt loadings.

移,从紫外拓展到可见光区域.这是由于N掺杂后,N的2*p*轨道和O的2*p*轨道发生杂化,形成新的价带,并且新价带位置向导带位置迁移,禁带宽度窄化^[15];也有可能是由于在NH₃气流中煅烧时,N原子取代了TiO₂晶格中的部分O原子,在价带上方形成一个独立的窄N2*p*能带,而该能带可对可见光的敏化产生响应^[32].但这种能带的窄化并未对TiO₂导带位置产生明显的移动.负载Pt后,N-TiO₂催化剂颜色逐渐变为灰黑色,在可见光区域的吸收增强.但这并不有利于提高催化剂的可见光催化活性,反而减弱了N-TiO₂对可见光的有效吸收,从而影响光催化剂活性.由图2(b)可见,Pt的负载并未影响N-TiO₂在可见光区的特征吸收,而是无选择性地增强了催化剂对可见光的吸收.

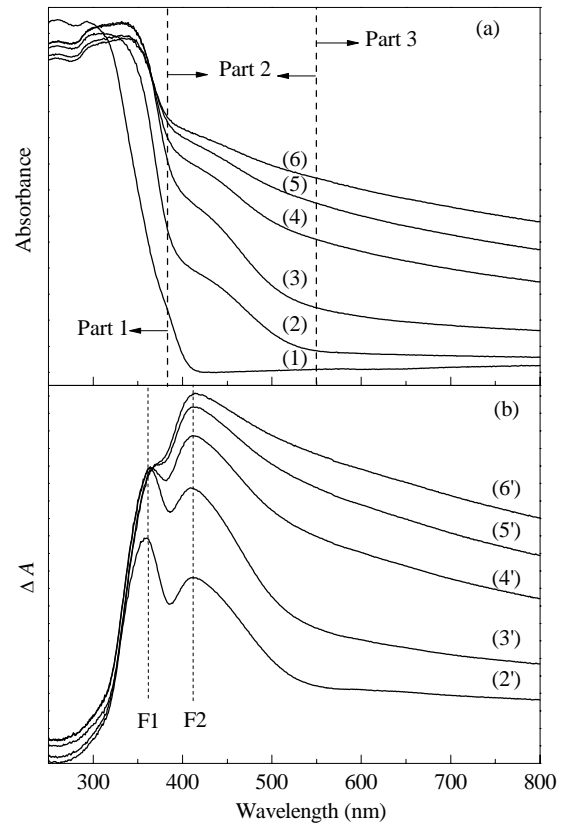


图 2 样品的 UV-Vis 谱和差值吸收光谱

Fig. 2. UV-Vis absorption spectra (a) and the difference of absorption spectra (b) of the samples. F1 caused by the result of TiO₂ crystallization, while F2 originated from the N doped effect. In Fig. 2(a): (1) TiO₂; (2) N-TiO₂; (3) 0.1%Pt/N-TiO₂; (4) 0.5%Pt/N-TiO₂; (5) 1.0%Pt/N-TiO₂; (6) 2.0%Pt/N-TiO₂. In Fig. 2(b): (2') = (2) - (1); (3') = (3) - (1); (4') = (4) - (1); (5') = (5) - (1); (6') = (6) - (1)

图 3 为 0.5% Pt/N-TiO₂ 样品的 TEM 和 HRTEM 照片. 由图可见,样品中存在蜂窝状介孔结构,颗粒尺寸为 8~12 nm. 由样品 HRTEM 照片可很清晰看到

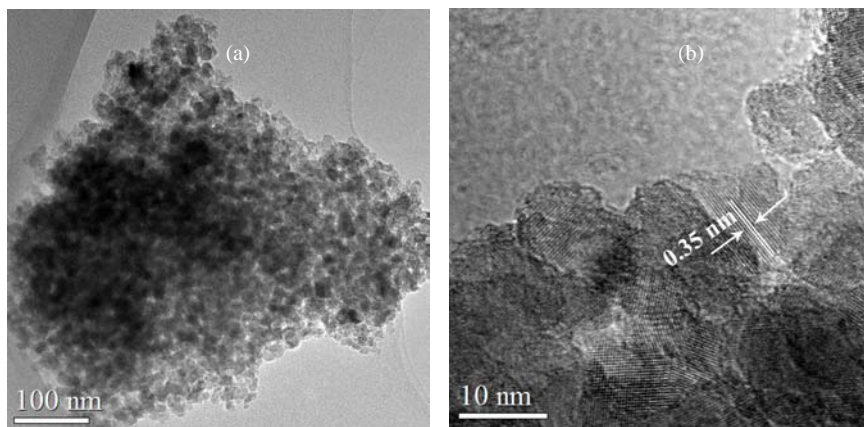


图 3 样品的 TEM 和 HRTEM 照片

Fig. 3. TEM (a) and HRTEM (b) images of 0.5% Pt/N-TiO₂ sample.

TiO₂ 的晶格条纹, 其中 $d=0.35$ nm 为锐钛矿 (101) 面的晶面间距; 但并未观察到 Pt 颗粒, 这是由于 Pt 载量较低且高度分散所致. 图 4 为 0.5% Pt/N-TiO₂ 样品的 XPS 谱. Pt 原子百分含量为 0.38%^[33]. 李熙等^[34]发现, 随着 Pt 负载量的增加, 在 TiO₂ 表面有 3 nm 左右的 Pt 颗粒.

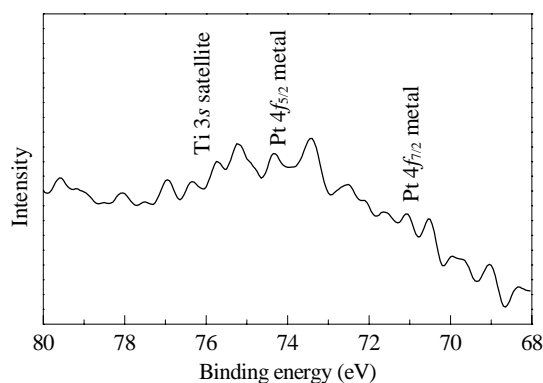


图 4 0.5%Pt/N-TiO₂ 的 XPS 谱

Fig. 4. Pt 4f XPS spectrum of 0.5% Pt/N-TiO₂ sample.

综上所述, Pt 的负载并未明显改变催化剂的晶相和孔结构, 但对其光吸收特性, 特别是对可见光部分的吸收影响很大.

2.2 Pt/N-TiO₂ 可见光催化活性

图 5 为不同 Pt 负载量的 Pt/N-TiO₂ 样品上可见光催化降解 MO 的活性, 可以看出, 随着 Pt 的负载及负载量的增加, 样品可见光催化降解 MO 的活性急剧增加, 至 0.5% 时达最大, 为未修饰 N-TiO₂ 的 8 倍. 随着 Pt 负载量的继续增加, 样品催化活性有所下降, 但仍然大于 N-TiO₂. 随着 Pt 负载量的增加, 催化剂颜色由浅黄色向黑色逐渐加深, 由此造成的光吸收的增加是由 Pt 颗粒引起的背景吸收, 它的存在可削弱催化剂的光激发中心对可见光的有效吸收, 从而降低光催化活性. 另外, 随着 Pt 负载量的增加, 过量的 Pt 会成为光生载流子的复合中心, 也会降低光催化活性^[35].

2.3 Pt 负载对 N-TiO₂ 可见光催化活性的影响

荧光谱可广泛用于研究光催化剂表面光生电子-空穴对的捕获、迁移和复合等^[36]. 我们前期工作已表明^[30]: 负载 Pt 后, N-TiO₂ 样品的固体荧光强度会明显地减弱. 这意味着样品表面光生载流子复合率降低了, 也就是说 Pt 的存在有利于光生载流子的分离, 因而 Pt/N-TiO₂ 光催化活性更高.

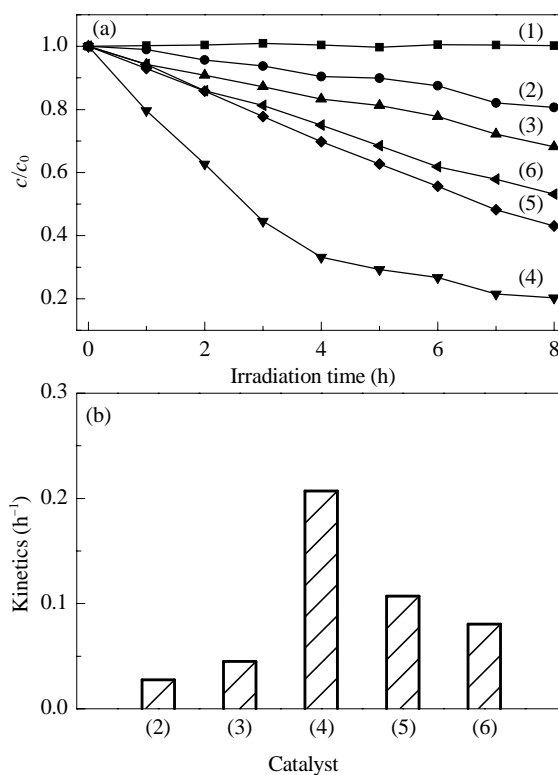


图 5 不同 Pt 负载量催化剂的可见光降解 MO 反应 (a) 及相关反应速率常数 (b)

Fig. 5 Photocatalytic degradation of MO (methyl orange) over the catalysts with different Pt loadings (a) and their reaction kinetics (b) under visible light irradiation. The kinetic is determined as $k = -\ln(c/c_0)/t$, where c_0 and c denoted the dye concentration before and after photocatalytic reaction, t denoted the time of reaction. (1) Blank; (2) N-TiO₂; (3) 0.1%Pt/N-TiO₂; (4) 0.5%Pt/N-TiO₂; (5) 1.0%Pt/N-TiO₂; (6) 2.0%Pt/N-TiO₂.

本文还采用化学荧光法研究了光催化反应的活性物种-羟基自由基 ($\bullet\text{OH}$) 的产生情况. 其原理是使用对苯二甲酸作为分子探针, 捕获 $\bullet\text{OH}$ 生成 2-羟基对苯二甲酸, 并通过研究其荧光强度的变化来表征 $\bullet\text{OH}$ 的生成量, 结果见图 6. 测试过程如下: 将 40 mg 催化剂加入到 80 ml 5.0 mmol/L 的对苯二甲酸溶液中, 待吸附平衡后, 开灯光照 ($\lambda > 420$ nm), 每隔 30 min 取样 3 ml, 高速离心, 取其上清液 (2-羟基对苯二甲酸) 放入荧光光谱仪中分析, 其中激发波长为 315 nm, 发射波长为 421 nm.

由图 6 可见, 在可见光的照射下, 未修饰的 N-TiO₂ 也能够产生 $\bullet\text{OH}$, 这与李川等^[37]的结果相似. 但是, Pt 的存在可促进催化剂体相及表面光生载流子的转移和分离, 从而大大增加 $\bullet\text{OH}$ 的产量, 提高了其光催化活性, 这与 Yu 等^[25]的结果一致.

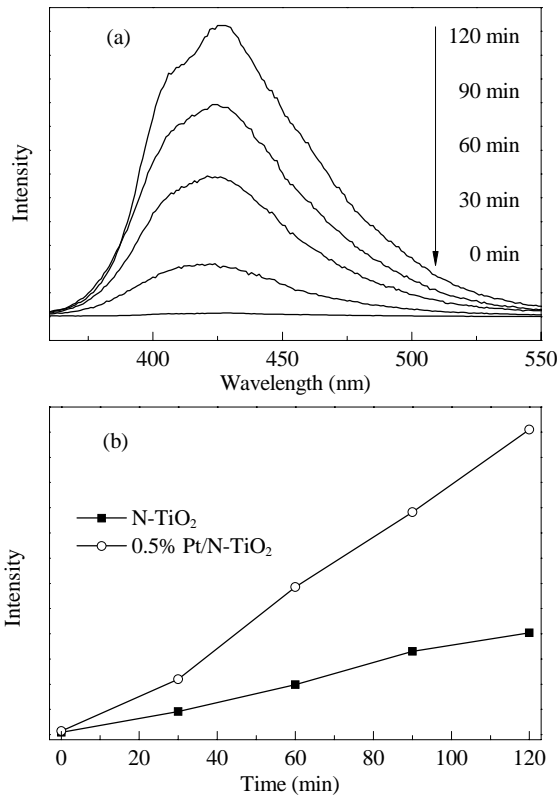


图 6 2-羟基苯二甲酸的荧光光谱和光谱强度随时间的变化

Fig. 6. PL spectra (a) of 2-hydroxyterephthalic acid and its intensity (426 nm) against irradiation time (b).

2.4 Pt 负载对 N-TiO₂ 催化剂表面电子结构的影响

通过在半导体表面担载贵金属可明显改变其表面的物化性质,特别是表面的电子态.而催化剂表面态的改变对其光催化活性影响很大.本文利用半导体电极的光电流-电压 (*I-V*) 特征曲线,来表征 Pt 负载对 N-TiO₂ 平带电势的影响^[28],结果见图 7.可以看出 Pt 的负载使 N-TiO₂ 表面的平带电势发生正移, Pt 负载量越多,正移的越明显.这主要是由于表面负载的 Pt 具有比较大的金属功函数,能够捕获大量的光生电子,从而造成电子在 Pt 表面富集.这不仅提高了 Pt 颗粒的平带电势,同时使得 N-TiO₂ 表面的光生电子密度降低,平带电位下降最终达到平衡,即表现平带电势(图 8, *E_F'*).总的来说,这是催化剂表面电子重新分布的结果,是一个动态平衡的过程.

由前文可知, Pt 的负载可有效地促进 N-TiO₂ 催化剂表面光生载流子的分离效率,提高其催化活性,但在 *I-V* 曲线中,其光电流值反而变小.这是因为表面的 Pt 与施加的偏压对光电子的捕获产生了竞争.

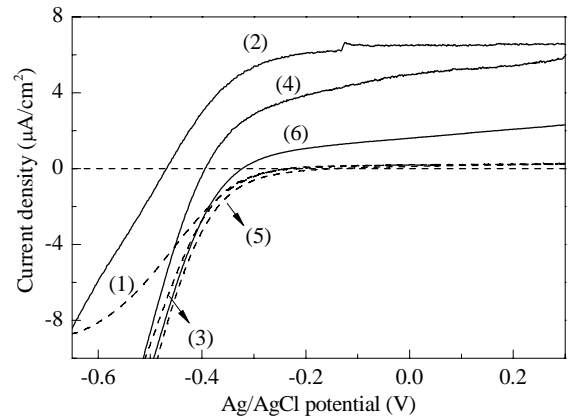


图 7 N-TiO₂ 和 Pt/N-TiO₂ 的光电流-电压曲线

Fig. 7. Photocurrent-potential curves of N-TiO₂ and Pt/N-TiO₂ electrodes. The area of the sample films is controlled to be 0.25 cm² and light irradiates from the back side (substance/sample film). (1) N-TiO₂, dark; (2) N-TiO₂, light; (3) 0.5% Pt/ N-TiO₂, dark; (4) 0.5% Pt/ N-TiO₂, light; (5) 2.0% Pt/ N-TiO₂, dark; (6) 2.0% Pt/ N-TiO₂, light.

由于 H₂ 在 Pt 颗粒表面的析出过电势很小,所以在较小的偏压下,光电子偏向于往 Pt 颗粒表面流动,反应生成 H₂. 随着偏压的增加,其对光电子的驱动力增加,越来越多的光电子开始往电极方向流动,光电流也开始逐渐变大(见图 7).

还可以发现, N 掺杂后 TiO₂ 导带位置并未发生明显的变化,与华南平等^[28]的结果一致.这表明掺杂 N 的作用主要是抬高价带或者在价带上方引入新的能级,从而达到窄化禁带宽度,使其具有可见光响应的目的.被抬高后的价带并没有足够的能量直接氧化羟基生成 •OH,但其导电电子却仍然有足够的能量还原氧,产生超氧自由基,而后者分解即可产生

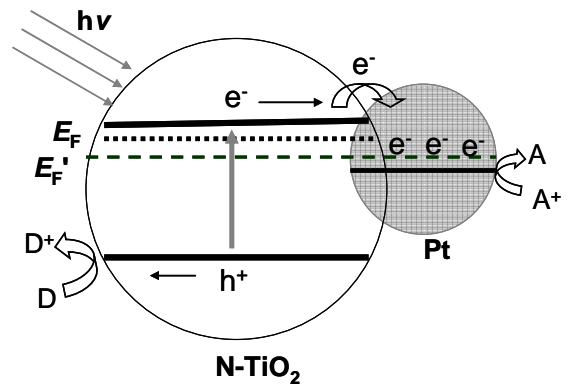


图 8 Pt/N-TiO₂ 电荷分布及转移示意图

Fig. 8. Scheme of charge distribution and transfer. Route one and route two are a competitive way for electron transfer. When no bias potential applied, route one dominates the process of electron transfer, efficiently suppressing photo-generated charge recombination.

•OH^[38].

3 结论

在热处理后的 N-TiO₂ 上负载 Pt, 可显著提高其可见光降解 MO 的活性. 这主要是由于 Pt 具有较大的金属功函数, 负载在 N-TiO₂ 表面可非常有效地捕获催化剂表面光生电子, 导致其电子能带结构发生变化, 从而有效地促进催化剂能带中光生载流子的分离, 抑制其复合, 因而其可见光降解 MO 的活性显著增加. Pt 的负载虽然增强了催化剂在可见光处的吸收, 但这是由 Pt 颗粒所引起的背景吸收, 会阻碍催化剂光激发中心 (N-TiO₂) 对可见光的有效吸收. 因此, Pt 负载量为 0.5% 时, N-TiO₂ 性能最佳.

参 考 文 献

- 高彩玲, 赵英明, 黄正文, 张斌. 环境科学与管理 (Gao C L, Zhao Y M, Huang Zh W, Zhang B. *Environ Sci Manag*), 2007, **32**(2): 31
- 顾列铭. 中国外资 (Gu L M. *Foreign Invest China*), 2005, (6): 107
- 程振华. 环境保护 (Cheng Zh H. *Environ Protect*), 1987, 7: 8
- 韩世同, 习海玲, 史瑞雪, 付贤智, 王绪绪. 物理化学学报 (Han Sh T, Xi H L, Shi R X, Fu X Zh, Wang X X. *Acta Phys-Chim Sin*), 2003, **16**: 339
- 邹志刚, 赵进才, 付贤智, 张彭义, 陈军, 朱鸿民, 叶金花. 功能材料信息 (Zou Zh G, Zhao J C, Fu X Zh, Zhang P Y, Chen J, Zhu H M, Ye J H. *Funct Mater Inf*), 2005, **2**(6): 15
- 杨祝红, 暴宁钟, 郑仲, 刘畅, 何明, 冯新, 陆小华. 催化学报 (Yang Zh H, Bao N Zh, Zheng Zh, Liu Ch, He M, Feng X, Lu X H. *Chin J Catal*), 2002, **23**: 539
- Nowotny J. *Energy Environ Sci*, 2008, **1**: 565
- Hernández-Alonso M D, Fresno F, Suárez S, Coronado J M. *Energy Environ Sci*, 2009, **2**: 1231
- Hoffman M R, Mattin S T, Choi W, Bahnemann D W. *Chem Rev*, 1995, **95**: 69
- Linsebigler A L, Lu G Q, Yates J T. *Chem Rev*, 1995, **95**: 735
- Shen L M, Bao N Z, Zheng Y Q, Gupta A, An T C, Yanagisawa K. *J Phys Chem C*, 2008, **112**: 8809
- 余家国, 赵修建. 催化学报 (Yu J G, Zhao X J. *Chin J Catal*), 2000, **21**: 213
- 张金龙, 陈锋, 何斌. 光催化. 上海: 华东理工大学出版社 (Zhang J L, Chen F, He B. *Photocatalysis*, Shanghai: East China University of Science and Technology Press), 2004. 44
- 蔡金华, 黄锦汪, 叶元坚, 余汉城, 计亮年. 催化学报 (Cai J H, Huang J W, Ye Y J, Yu H Ch, Ji L N. *Chin J Catal*), 2009, **30**: 440
- Asahi R, Morikawa T, Ohwaki T, Aoki K, Taga Y. *Science*, 2001, **293**: 269
- Ohno T, Mitsui T, Matsumura M. *Chem Lett*, 2003, **32**: 364
- Khan S U M, Al-Shahry M, Ingler Jr W B. *Science*, 2002, **297**: 2243
- Xu P, Xu T, Lu J, Gao S M, Hosmane N S, Huang B B, Dai Y, Wang Y B. *Energy Environ Sci*, 2010, **3**: 1128
- Mitoraj D, Kisch H. *Chem Eur J*, 2010, **16**: 261
- Zhang J L, Wu Y M, Xing M Y, Leghari S A K, Sajjad S. *Energy Environ Sci*, 2010, **3**: 715
- Gao B F, Ma Y, Cao Y A, Yang W S, Yao J N. *J Phys Chem B*, 2006, **110**: 14391
- Li D, Haneda H, Hishita S, Ohashi N. *Chem Mater*, 2005, **17**: 2596
- Sun B, Vorontsov A V, Smirniotis P G. *Langmuir*, 2003, **19**: 3151
- Bao N Z, Shen L M, Takata T, Lu D L, Domen K. *Chem Lett*, 2006, **35**: 318
- Yu J G, Qi L F, Jaroniec M. *J Phys Chem C*, 2010, **114**: 13118
- Li Y X, Lu G X, Li S B. *Appl Catal A*, 2001, **214**: 179
- Li Y X, Lu G X, Li S B. *J Photochem Photobiol A*, 2002, **152**: 219
- 华南平, 吴遵义, 杜玉扣, 邹志刚, 杨平. 物理化学学报 (Hua N P, Wu Z Y, Du Y K, Zou Zh G, Yang P. *Acta Phys-Chim Sin*), 2005, **21**: 1081
- Li D Z, Chen Z X, Chen Y L, Li W J, Huang H J, He Y H, Fu X Z. *Environ Sci Technol*, 2008, **42**: 2130
- Chen X F, Wang X C, Hou Y D, Huang J H, Wu L, Fu X Z. *J Catal*, 2008, **255**: 59
- Fu X Zh, Zeltner W A, Yang Q, Anderson M A. *J Catal*, 1997, **168**: 482
- Irie H, Watanabe Y, Hashimoto K. *J Phys Chem B*, 2003, **107**: 5483
- 刘福生, 吉仁, 吴敏, 孙岳明. 物理化学学报 (Liu F Sh, Ji R, Wu M, Sun Y M. *Acta Phys-Chim Sin*), 2007, **23**: 1899
- 李熙. [硕士学位论文]. 福州: 福州大学 (Li X. [MS Dissertation]. Fuzhou: Fuzhou University), 2009
- Zhao W, Chen C C, Li X Z, Zhao J C, Hidaka H, Serpone N. *J Phys Chem B*, 2002, **106**: 5022
- Wang X C, Maeda K, Chen X F, Takanabe K, Domen K, Hou Y D, Fu X Zh, Antonietti M. *J Am Chem Soc*, 2009, **131**: 1680
- 李川, 李兆华, 柳松, 古国榜. 环境工程学报 (Li Ch, Li Zh H, Liu S, Gu G B. *Chin J Environ Eng*), 2009, **3**: 1714
- Li W J, Li D Z, Zhang W J, Hu Y, He Y H, Fu X Zh. *J Phys Chem C*, 2010, **114**: 2154