

# TiO<sub>2</sub>/活性炭负载型光催化剂的溶胶-凝胶法合成及表征

刘守新, 陈 曦

(东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:**以钛酸四丁酯为钛源,采用溶胶-凝胶法在多孔活性炭(AC)表面合成 TiO<sub>2</sub> 前驱体,在氮气保护下程序升温处理制得 TiO<sub>2</sub>/AC 负载型光催化剂.采用 X 射线衍射、漫反射光谱、傅里叶变换红外光谱、扫描电镜、能量色散谱和低温液氮吸附等对光催化剂晶相结构、光谱特征及表面结构进行了表征.结果表明,AC 可提高 TiO<sub>2</sub> 分散性能,降低 TiO<sub>2</sub> 团聚体的尺寸,并抑制其由锐钛矿相向金红石相的转变. TiO<sub>2</sub> 与 AC 接触界面处有 Ti-O-C 键生成.另外,AC 的含量对 TiO<sub>2</sub> 的能带结构和晶粒大小影响不大.苯酚溶液的光催化降解测试结果表明,AC 负载可为 TiO<sub>2</sub> 提供高浓度反应环境,适宜量的负载可显著提高 TiO<sub>2</sub> 对有机稀溶液的光催化降解活性.对于 50 mg/L 苯酚的光催化降解,AC 的质量分数分别为 5%,9% 和 11% 时催化剂协同系数分别为 1.1,1.5 和 1.3.循环使用 7 次后,AC 含量为 9% 的催化剂对苯酚的降解率仍达 95.84%.

**关键词:**活性炭;二氧化钛;溶胶-凝胶;负载型光催化剂;苯酚;降解

**中图分类号:** O643 **文献标识码:** A

## Sol-Gel Preparation and Characterization of Activated Carbon Supported TiO<sub>2</sub> Photocatalyst

LIU Shouxin\*, CHEN Xi

(College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Activated carbon (AC)-supported TiO<sub>2</sub> photocatalysts (TiO<sub>2</sub>/AC) were prepared by a sol-gel method from Ti(OBu)<sub>4</sub>. The photocatalysts were characterized by X-ray diffraction, diffuse reflectance spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopic analysis, and N<sub>2</sub> adsorption isotherm. The results indicated that AC could improve the dispersion, decrease the aggregate size, and inhibit the phase transformation of TiO<sub>2</sub> from anatase to rutile. Ti-O-C bonds were formed between the AC bulk and TiO<sub>2</sub>. AC had no effect on the band-gap structure and crystalline size of TiO<sub>2</sub>. The photocatalytic activity was investigated by phenol degradation. The results showed that AC could provide high reaction concentration for TiO<sub>2</sub>. TiO<sub>2</sub>/AC with a suitable AC content exhibited higher activity than naked TiO<sub>2</sub> for low concentration phenol. Synergy coefficients observed for the catalyst with 5%, 9%, and 15% AC were 1.1, 1.5, and 1.3, respectively. Phenol removal of 95.84% was achieved even when the catalyst with 9% AC was recycled seven times.

**Key words:** activated carbon; titania; supported photocatalyst; sol-gel method; phenol; degradation

光催化反应过程中有机物分子与催化剂 TiO<sub>2</sub> 碰撞并在其表面富集,低浓度下污染物分子与 TiO<sub>2</sub> 的碰撞频率很低,反应较慢<sup>[1-5]</sup>. 反应可以发生在距催化剂活性中心表面几纳米的范围内,因而将催

化剂负载在惰性物质表面也可对有机污染物产生光催化降解作用<sup>[6-8]</sup>. 很多研究者将 TiO<sub>2</sub> 与吸附剂结合,通过吸附剂所提供的高浓度环境来提高 TiO<sub>2</sub> 的光催化活性<sup>[9-23]</sup>. 活性炭(AC)具有发达的孔隙

结构、巨大的比表面积以及表面非极性的化学性质,  $\text{TiO}_2$  与 AC 形成复合体系能明显提高催化活性. 研究表明, 采用酸催化水解法合成的  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂, 在 AC 含量适宜(5%)时具有最高的催化活性, 可多次循环使用不致失活, 在较宽溶液 pH 范围内都保持较高的活性, 而且很容易从液相中分离<sup>[11~26]</sup>. 但水解法条件较为苛刻, 而溶胶-凝胶法因其制备条件温和应用更加广泛<sup>[27]</sup>.

本文以钛酸四丁酯为钛源, 采用溶胶-凝胶法在多孔活性炭表面合成  $\text{TiO}_2$  前驱体, 在氮气保护下进行程序升温处理制得  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂. 考察了催化剂活性变化规律, 并结合漫反射光谱(DRS)、X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDAX)和傅里叶变换红外光谱(FT-IR)表征结果, 探讨了 AC 诱发催化剂活性变化的机理.

## 1 实验部分

### 1.1 催化剂制备

将 35 ml 无水乙醇与 32 ml 去离子水混合, 以 1 mol/L 的 HCl 水溶液调节混合液 pH = 2~3, 制得 A 液. 将适量粉状 AC(比表面积  $1150.6 \text{ m}^2/\text{g}$ , 微孔容积  $0.28 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 中孔容积  $0.07 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 大孔容积  $0.24 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 总孔容积  $0.59 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 平均孔径  $2.95 \text{ nm}$ )加入到 35 ml 钛酸四丁酯、23 ml 冰醋酸和 70 ml 无水乙醇的混合液中, 搅拌均匀, 制得 B 液. 在强力搅拌下, 将 A 液以  $4 \text{ ml}/\text{min}$  的速度滴加至 B 液. 滴加完毕后, 于  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  恒温继续搅拌 100 min. 室温静置 12 h, 凝胶, 老化 24 h, 再于  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  下干燥 24 h 后研磨, 装入水平石英管式反应器中, 在  $\text{N}_2$  气氛中以  $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  先升温至  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , 恒温 1 h 后以相同速度升温至  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , 恒温煅烧 2 h. 而后在  $\text{N}_2$  气氛中冷却至室温, 研磨待用. AC 含量为 5%, 9% 和 15% 的催化剂分别标记为  $\text{TiO}_2/5\% \text{ AC}$ ,  $\text{TiO}_2/9\% \text{ AC}$  和  $\text{TiO}_2/15\% \text{ AC}$ .

### 1.2 催化剂表征

光催化剂 DRS 测试在装有积分球的 TU-1900 型紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限公司)上进行, 以  $\text{BaSO}_4$ (分析纯)做参比. XRD 测试在 D/max-rB 型 X 射线衍射仪(日本理学株式会社)上进行,  $\text{Cu K}_\alpha$  射线, 电压 45 kV, 电流 40 mA, 根据 Scherrer 公式计算晶粒大小. 通过 QUANTA 200 型扫描电镜(德国里奥)观察催化剂表面形貌, 以扫描电镜上配置的 Genesis 能谱仪测试观察催化剂的各

组分分布及  $\text{TiO}_2$  在 AC 表面的分散状况. BET 测试在 ST-2000 型比表面孔径测定仪上进行, 采用液氮温度下  $\text{N}_2$  吸附法测定, 以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  做参比. FT-IR 测试在 MANGNA 560 型傅里叶变换红外光谱仪(美国尼力高公司)上进行, 采用 KBr 压片法.

### 1.3 催化剂活性测试

光催化反应在自制石英管式反应器内进行<sup>[27]</sup>. 反应器的装液量为 250 ml, 外层以铝箔包覆, 内置一石英滤光管, 管内置一主波长为 365 nm 的 8 W 低压汞灯(南京紫光电器厂). 从反应器底部以  $580 \text{ ml}/\text{min}$  的速度通入空气, 起补充溶解氧和搅拌作用. 在光催化反应开始前, 避光磁力搅拌 30 min, 以使模型物苯酚( $50 \text{ mg}/\text{L}$ )在催化剂表面达到吸附平衡. 催化剂用量为  $1 \text{ g}/\text{L}$ . 每 20 min 取样 8 ml, 离心分离 10 min, 取上层清液测定苯酚吸光度( $270 \text{ nm}$ ), 根据朗伯-比尔定律计算模型物浓度.

光催化剂的使用寿命测试与活性测试方式相同<sup>[27]</sup>, 催化剂反应 120 min 后自然沉降分离, 然后直接加入反应器中, 循环进行光催化活性测试.

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 及比表面积分析

图 1 为不同 AC 含量的光催化剂在  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  下煅烧 2 h 所得样品的 XRD 谱图. 由图可知  $\text{TiO}_2$  与  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  在  $2\theta = 25.28^\circ$  处均有明显衍射峰, 且各峰对应的面间距  $d$  值与 JCPDS 卡中 211272 号锐钛矿型  $\text{TiO}_2$  的  $d$  值完全一致, 说明样品均为锐钛矿相. 根据衍射峰积分峰宽, 采用 Scherrer 公式<sup>[6]</sup>计算

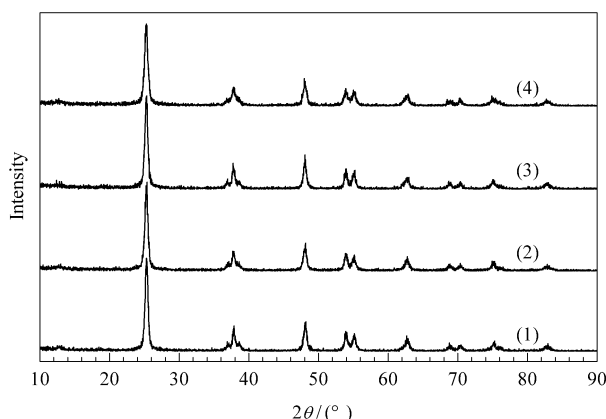


图 1 不同 AC 含量的  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  的 XRD 谱  
Fig 1 XRD patterns of  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  photocatalysts with various AC contents  
(1)  $\text{TiO}_2$ , (2)  $\text{TiO}_2/5\% \text{ AC}$ , (3)  $\text{TiO}_2/9\% \text{ AC}$ , (4)  $\text{TiO}_2/15\% \text{ AC}$

TiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/5% AC, TiO<sub>2</sub>/9% AC 和 TiO<sub>2</sub>/15% AC 光催化剂中 TiO<sub>2</sub> 平均晶粒尺寸分别为 15.0, 14.9, 15.0 和 13.1 nm. 可见, AC 的存在对 TiO<sub>2</sub> 晶相结构和晶粒尺寸影响不大.

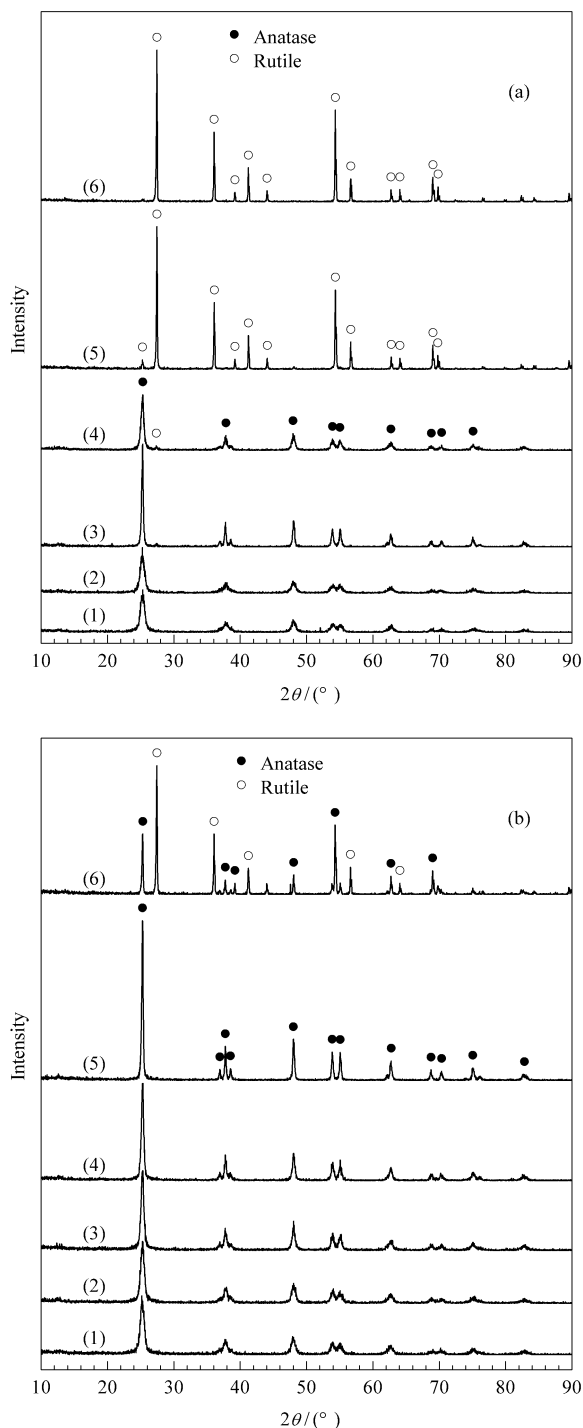


图 2 不同温度煅烧下 TiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub>/9% AC 的 XRD 谱  
Fig 2 XRD patterns of TiO<sub>2</sub> (a) and TiO<sub>2</sub>/9% AC (b) calcined at different temperatures  
(1) 300 °C, (2) 400 °C, (3) 500 °C, (4) 600 °C, (5) 700 °C, (6) 800 °C

从图 2 可见, TiO<sub>2</sub> 在 600 °C 煅烧时有金红石相出现, 700 °C 时基本全部转化为金红石相. 而 TiO<sub>2</sub>/9% AC 则在 800 °C 才开始由锐钛矿相向金红石相转变. 由此表明, AC 可以抑制 TiO<sub>2</sub> 向由锐钛矿相向金红石相转变. 这可能是 AC 的强吸附性能对 TiO<sub>2</sub> 晶粒的生长起阻抑作用, 使其相变活化能增大, 相变温度升高<sup>[27]</sup>. 另外, 从图 3 可以看出, 在煅烧温度高于 500 °C 时, 催化剂比表面积迅速下降, 晶粒生长速度明显加快.

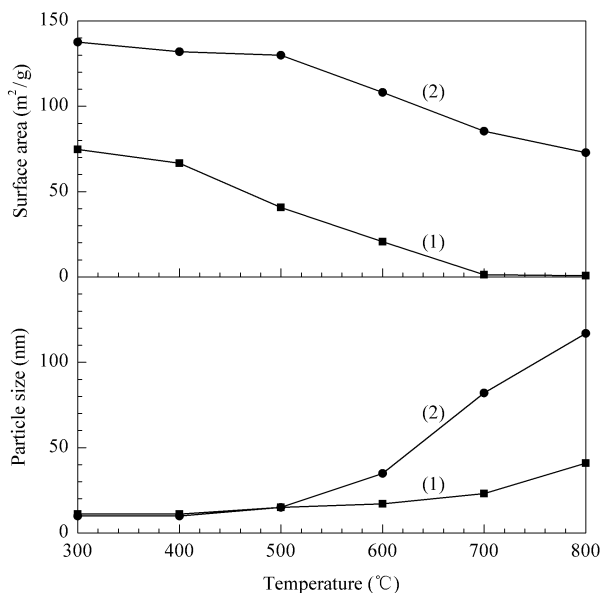


图 3 煅烧温度对 TiO<sub>2</sub> 与 TiO<sub>2</sub>/9% AC 比表面积和晶粒的影响  
Fig 3 Effect of calcination temperature on the specific surface areas and crystal sizes of TiO<sub>2</sub> (1) and TiO<sub>2</sub>/9% AC (2)

## 2.2 SEM 及 EDAX 分析

由图 4 可以看出, 纯 TiO<sub>2</sub> 粒子间发生团聚, 团聚体尺寸为 500 ~ 1 000 nm. 而 TiO<sub>2</sub>/AC 样品中 TiO<sub>2</sub> 主要分布在活性炭颗粒上面, TiO<sub>2</sub> 粒子团聚程度降低, 团聚体尺寸在 100 ~ 200 nm. 图 5 的 EDAX 分析进一步证实了 TiO<sub>2</sub> 在 AC 颗粒上面有较好的分散性.

## 2.3 FT-IR 和 DRS 光谱分析

如图 6 所示, 对于 TiO<sub>2</sub>, 3 430 和 1 630 cm<sup>-1</sup> 处分别为催化剂表面 O-H 伸缩振动峰和弯曲振动峰; 520 cm<sup>-1</sup> 对应 Ti-O 伸缩振动峰. 与酸催化水解法合成的 TiO<sub>2</sub>/AC 相似, AC 的添加引起 Ti-O 伸缩振动峰向低波数移动, 但对 TiO<sub>2</sub> 表面键合羟基数量与性质影响不大. 图中 1 021 cm<sup>-1</sup> 处出现的吸收峰可能源于 TiO<sub>2</sub> 与 AC 的接触界面处 Ti-O-C 键的生成<sup>[27]</sup>.

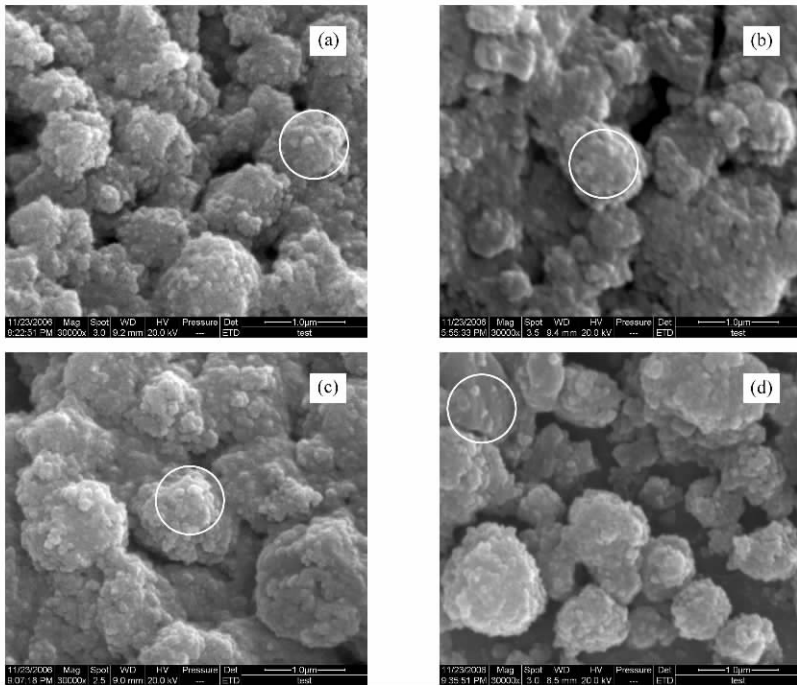


图 4 不同 AC 含量的  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂的 SEM 照片

Fig 4 SEM images of  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  photocatalysts with various AC contents

(a)  $\text{TiO}_2$ , (b)  $\text{TiO}_2/5\% \text{AC}$ , (c)  $\text{TiO}_2/9\% \text{AC}$ , (d)  $\text{TiO}_2/15\% \text{AC}$

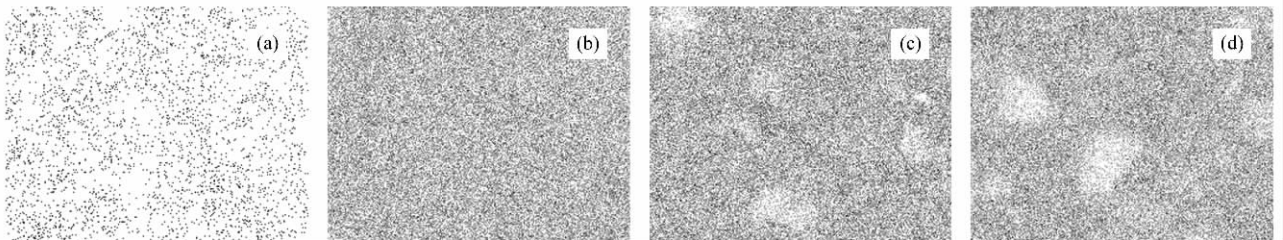


图 5 不同 AC 含量的  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂的 EDAX-Ti 照片

Fig 5 EDAX-Ti images of  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  photocatalysts with various AC contents

(a)  $\text{TiO}_2$ , (b)  $\text{TiO}_2/5\% \text{AC}$ , (c)  $\text{TiO}_2/9\% \text{AC}$ , (d)  $\text{TiO}_2/15\% \text{AC}$

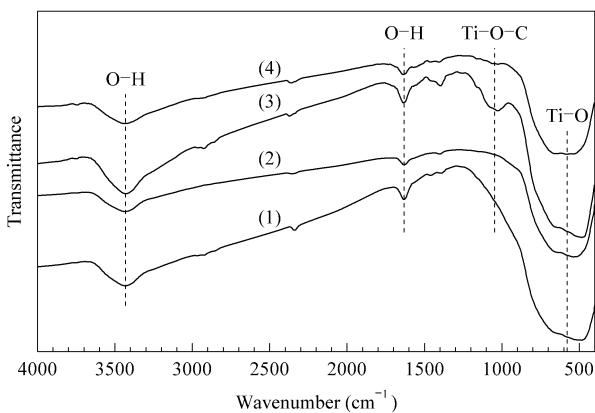


图 6 不同 AC 含量的  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂的 FT-IR 谱

Fig 6 FT-IR spectra of  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  photocatalysts

with various AC contents

(1)  $\text{TiO}_2$ , (2)  $\text{TiO}_2/5\% \text{AC}$ , (3)  $\text{TiO}_2/9\% \text{AC}$ , (4)  $\text{TiO}_2/15\% \text{AC}$

由图 7 可见,  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂在可见光区域的反射明显减弱, 这是 AC 的强吸光特性造成的.  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂的光吸收阈值并未发生改变, 仍在 380 nm 左右, 表明 AC 的存在对  $\text{TiO}_2$  的能带结构没有显著影响.

#### 2.4 光催化活性

$\text{TiO}_2/\text{AC}$  对 50 mg/L 苯酚的光催化降解结果如图 8 所示. 可以看出, 采用溶胶-凝胶法制备的纯  $\text{TiO}_2$  光催化活性与 P-25 相近. 尽管 AC 的存在会部分降低  $\text{TiO}_2$  对紫外光的吸收, 但  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化活性却显著提高, AC 含量为 9% 时活性最高,  $\text{TiO}_2/9\% \text{AC}$  可在 100 min 内完全去除苯酚, 而相同条件下  $\text{TiO}_2$  需 160 min, P-25 需 140 min.

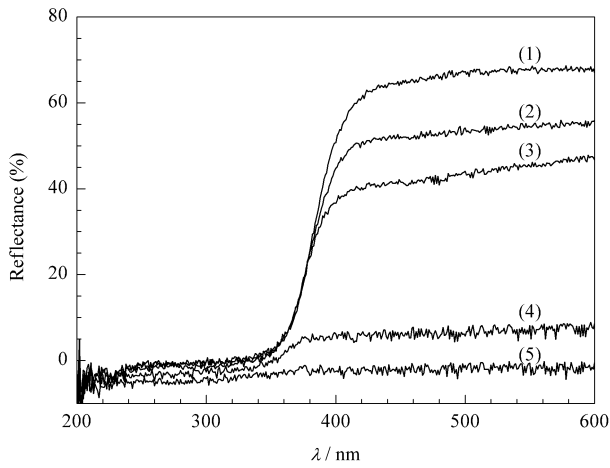


图 7 AC 及不同 AC 含量的 TiO<sub>2</sub>/AC 的漫反射光谱

Fig 7 DRS spectra of TiO<sub>2</sub>/AC photocatalysts with various AC contents  
(1) TiO<sub>2</sub>, (2) TiO<sub>2</sub>/5% AC, (3) TiO<sub>2</sub>/9% AC, (4) TiO<sub>2</sub>/15% AC, (5) AC

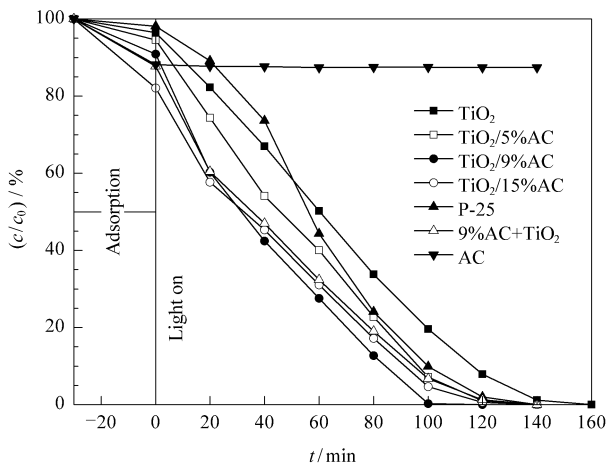


图 8 AC, P-25 及不同 AC 含量的 TiO<sub>2</sub>/AC 光催化降解苯酚的活性

Fig 8 Photocatalytic activity of AC, P-25, and TiO<sub>2</sub>/AC with various AC contents

动力学分析表明,苯酚的光催化降解基本遵循准一级反应动力学, TiO<sub>2</sub>/AC 体系相对于纯 TiO<sub>2</sub> 活性的提高以协同系数( TiO<sub>2</sub>/AC 和纯 TiO<sub>2</sub> 体系的一级反应动力学常数之比)来表示<sup>[10]</sup>, 具体结果列于表 1. TiO<sub>2</sub>/5% AC, TiO<sub>2</sub>/9% AC 和 TiO<sub>2</sub>/15% AC 的协同系数分别为 1.1, 1.5 和 1.3, 可见, TiO<sub>2</sub>/9% AC 的协同系数最大.

从图 8 还可以看出,用 TiO<sub>2</sub> 与 9% AC 的机械混合物代替 TiO<sub>2</sub>/9% AC, 其活性虽然高于 TiO<sub>2</sub>, 但低于 TiO<sub>2</sub>/9% AC. 这进一步表明 AC 不仅为 TiO<sub>2</sub> 提供了高浓度的有机污染物反应环境, 还与 TiO<sub>2</sub> 之间存在协同效应.

表 1 AC, P-25 及不同 AC 含量的 TiO<sub>2</sub>/AC 光催化降解苯酚动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of phenol degradation photocatalyzed by TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>/AC with various AC contents

Photocatalyst	$k/\text{min}^{-1}$	Phenol removal* (%)	Synergy coefficient
TiO <sub>2</sub>	0.012	80.4	1
TiO <sub>2</sub> /5% AC	0.013	92.9	1.1
TiO <sub>2</sub> /9% AC	0.019	100.0	1.5
TiO <sub>2</sub> /15% AC	0.016	94.4	1.3
AC	0.0015	87.4	—
P-25	0.017	90.1	—

\* At 100 min.

如图 9 所示,在低浓度(20 和 50 mg/L)时, TiO<sub>2</sub>/9% AC 对苯酚的降解效率远远高于 TiO<sub>2</sub>. 而当苯酚浓度增大至 75 mg/L 时, TiO<sub>2</sub>/9% AC 与 TiO<sub>2</sub> 对苯酚的降解率差距已相差较小. 进一步增大苯酚浓度至 100 mg/L 时, TiO<sub>2</sub>/9% AC 与 TiO<sub>2</sub> 的降解效率几乎相同. 由此表明在稀溶液中, AC 的强吸附性能可为 TiO<sub>2</sub> 提供高浓度有机污染物反应环境,从而加快光催化反应速度.

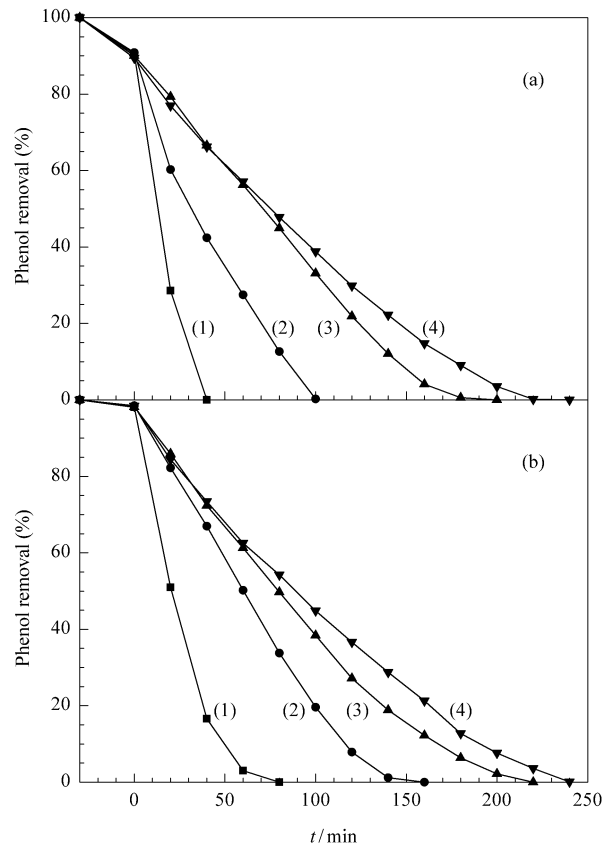


图 9 不同苯酚浓度下 TiO<sub>2</sub>/9% AC 和 TiO<sub>2</sub> 的光催化活性

Fig 9 Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>/9% AC (a) and TiO<sub>2</sub> (b) for phenol degradation

Phenol concentration (mg/L): (1) 20, (2) 50, (3) 75, (4) 100

中间产物在光催化剂  $\text{TiO}_2$  表面的累积可导致  $\text{TiO}_2$  失活<sup>[13-19, 27]</sup>. 表 2 列出了  $\text{TiO}_2/9\%$  AC 催化剂在重复使用时对苯酚的光催化降解活性. 结果表明, 循环使用 7 次后  $\text{TiO}_2/9\%$  AC 在 120 min 内对苯酚的降解率仍达 95.84%. 而 9% AC 与  $\text{TiO}_2$  的机械混合物则在第 2 次使用后即几乎完全失活.

表 2 循环使用下  $\text{TiO}_2/9\%$  AC 对苯酚的光催化降解率  
Table 2 Phenol removal efficiency of  $\text{TiO}_2/9\%$  AC recycled for different times

Run cycle	Phenol removal (%)
1	100.00
2	98.99
3	98.91
4	98.86
5	98.76
6	98.07
7	95.84

### 3 结论

对于溶胶-凝胶法合成的  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂, 适宜的 AC 含量可为  $\text{TiO}_2$  提供高浓度反应环境, 显著提高其对有机稀溶液的光催化降解活性, 并抑制催化剂失活, 提高催化剂使用寿命, 还可提高  $\text{TiO}_2$  分散性能, 降低  $\text{TiO}_2$  团聚体的尺寸, 抑制  $\text{TiO}_2$  由锐钛矿相向金红石相的转变.  $\text{TiO}_2/\text{AC}$  光催化剂在有机微污染深度净化领域展示出良好的应用前景.

### 参 考 文 献

- Hoffmann M R, Martin S T, Choi W Y, Bahnemann D W. *Chem Rev*, 1995, **95**(1): 69
- Blake D M. Bibliography of Work on the Heterogeneous Photocatalytic Removal of Hazardous Compounds from Water and Air. Update Number 3 to January 1999. NREL/TP-570-26797. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1999
- Linsebigler A L, Lu G Q, Yates J T. *Chem Rev*, 1995, **95**(3): 735
- Prleni M P. *Catal Today*, 2000, **58**(2-3): 151
- Herrmann J M. *Catal Today*, 1999, **53**(1): 115
- 刘守新, 刘鸿. 光催化及光电催化基础与应用, 北京: 化学工业出版社( Liu Sh X, Liu H. Fundamental and Application of Photocatalysis and Electro-Photocatalysis. Beijing: Chem Ind Press), 2005. 135
- 刘守新, 曲振平, 韩秀文, 孙承林, 包信和. 催化学报 ( Liu Sh X, Qu Zh P, Han X W, Sun Ch L, Bao X H. *Chin J Catal* ), 2004, **25**(2): 133
- Matos J, Laine J, Herrman J M, Uzcatogui D, Brito J L. *Appl Catal B*, 2007, **70**(1-4): 461
- Torimoto T, Okawa Y, Takeda N, Yoneyama H. *J Photochem Photobiol A*, 1997, **103**(1-2): 153
- Matos J, Laine J, Herrman J M. *Appl Catal B*, 1998, **18**(3-4): 281
- Ei-Sheikh A H, Sweileh J A. *Talanta*, 2007, **71**(15): 1867
- Lettmann C, Hidebrand K, Kisch H, Macyk W, Maier W F. *Appl Catal B*, 2001, **32**(4): 215
- Matos J, Laine J, Herrmann J M. *Carbon*, 1999, **37**(11): 1870
- Araña J, Doña-Rodríguez J M, Tello Rendon E, Garrigai Cabo C, Gonzalez-Diaz O, Herrera-Melian J A, Perez-Pena J, Colon G, Navio J A. *Appl Catal B*, 2003, **44**(2): 161
- Araña J, Doña-Rodríguez J M, Tello Rendon E, Garrigai Cabo C, Gonzalez-Diaz O, Herrera-Melian J A, Perez-Pena J, Colon G, Navio J A. *Appl Catal B*, 2003, **44**(2): 153
- Tryba B, Morawski A W, Inagaki M. *Appl Catal B*, 2003, **41**(4): 427
- Ao C H, Lee S C. *Appl Catal B*, 2003, **44**(3): 191
- Ao C H, Lee S C. *J Photochem Photobiol A*, 2004, **161**(2-3): 131
- Przepiórski J, Yoshizawa N, Yamada Y. *J Mater Sci*, 2001, **36**(17): 4249
- Tryba B, Morawski A W, Inagaki M. *Appl Catal B*, 2003, **46**(1): 203
- Lu M C, Chen J N, Chang K T. *Chemosphere*, 1999, **38**(3): 617
- El-Sheikh A H, Ai-Degs Y S, Newman A P, Lynch D E. *Sep Purif Technol*, 2007, **54**(1): 117
- Chiang Y C, Chiang P C, Huang C P. *Carbon*, 2001, **39**(4): 523
- Cordeo T, Chovelon J-M, Duchamp C, Ferronato C, Matos J. *Appl Catal B*, 2007, **73**(3-4): 227
- Wang W D, Silva C G, Faria J L. *Appl Catal B*, 2007, **70**(1-4): 470
- Martra G. *Appl Catal A*, 2000, **200**(1-2): 275
- 陈孝云, 刘守新, 陈曦, 孙承林. 物理化学学报( Chen X Y, Liu Sh X, Chen X, Sun Ch L. *Acta Phys-Chim Sin* ), 2006, **22**(5): 517

(Ed ZChY)