

梁文珍,王慧龙,姜文凤. 2011. 太阳光下 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂光催化降解 2,4-二硝基酚[J]. 环境科学学报, 31(6): 1162-1167
Liang W Z, Wang H L, Jiang W F. 2011. Solar photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol (DNP) using $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ aerogel composite photocatalysts [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(6): 1162-1167

太阳光下 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂光催化降解 2,4-二硝基酚

梁文珍,王慧龙*,姜文凤

大连理工大学化学学院,大连 116023

收稿日期:2010-09-15 修回日期:2010-10-15 录用日期:2010-10-20

摘要:以正硅酸乙酯(TEOS)为原料,采用溶胶-凝胶法(sol-gel)和常压干燥法制备 SiO_2 气凝胶,在此基础上,将硅气凝胶掺杂进入 TiO_2 溶胶中制备出 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂.利用 XRD、TEM 和 FT-IR 等技术对其晶型、形貌和结构进行表征.研究了太阳光下 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂对 2,4-二硝基酚(DNP)的光催化降解性能.结果表明,500℃焙烧后的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合材料对 DNP 溶液的吸附率和光降解率明显优于纯 TiO_2 样品.加入 7.5% (质量分数) SiO_2 气凝胶的复合光催化剂表现出最佳的光催化活性.根据 Langmuir-Hinshelwood 方程,在低浓度下光催化降解 DNP 的反应符合一级反应动力学.

关键词:二氧化钛;二氧化硅;气凝胶;光催化剂;2,4-二硝基酚

文章编号:0253-2468(2011)06-1162-06 中图分类号:X513 文献标识码:A

Solar photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol (DNP) using $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ aerogel composite photocatalysts

LIANG Wenzhen, WANG Huilong*, JIANG Wenfeng

College of Chemistry, Dalian University of Technology, Dalian 116023

Received 15 September 2010; received in revised form 15 October 2010; accepted 20 October 2010

Abstract: Silica aerogels were synthesized by sol-gel technique at ambient pressure using tetraethyl orthosilicate. The $\text{TiO}_2/\text{silica}$ aerogel composite photocatalysts were prepared by doping silica aerogel into the nanosized TiO_2 particles. The microstructure and morphology of the photocatalysts were characterized by XRD, TEM and FT-IR techniques. The photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol (DNP) was investigated by using this novel $\text{TiO}_2/\text{silica}$ aerogel composite photocatalyst under solar light irradiation. The results showed that the highest photocatalytic activity was obtained when the composite sample was calcined at 500℃ with an optimal silica aerogel content of 7.5% (wt.). Compared to the pure TiO_2 catalyst, the $\text{TiO}_2/\text{silica}$ aerogel composite photocatalyst showed much higher adsorption capacity and photocatalytic degradation efficiency for DNP. The photocatalytic reaction is discussed in terms of Langmuir-Hinshelwood model and it followed pseudo-first order kinetics at low concentration.

Keywords: titania; silica; aerogel; photocatalyst; 2,4-dinitrophenol

1 引言 (Introduction)

2,4-二硝基酚(DNP)作为杀虫剂、除草剂、阻聚剂等被广泛地应用于工农业生产中(菅秀君等, 2000).在 DNP 生产和使用过程中,会产生大量难以降解的有机废水,对人类和环境造成极大危害. DNP 属于美国 EPA 规定的优先控制污染物(Uberoi *et al.*, 1997),因此对含 DNP 废水的治理研究具有重要的现实意义.

纳米二氧化钛光催化剂具有化学稳定性好、无毒、低成本等特点.研究表明,二氧化钛在紫外光照射下对硝基酚类持久性有机污染物具有较强的降解能力,已成为近年来污染治理技术的研究热点(Wang *et al.*, 1997; Eberlein *et al.*, 2002; 常江等, 2009). TiO_2 光催化反应属于非均相反应,反应在催化剂的表面进行,所以催化剂对污染物的吸附是影响其催化降解性能的重要因素.但是,传统 TiO_2 光催化剂比表面积小,吸附能力差,限制了光催化技

基金项目:国家自然科学基金(No. 20977013)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 20977013)

作者简介:梁文珍(1985—),女, E-mail: liangwenzhen1985@163.com; * 通讯作者(责任作者) E-mail: hlwang@dlut.edu.cn

Biography: LIANG Wenzhen (1985—), female, E-mail: liangwenzhen1985@163.com; * Corresponding author E-mail: hlwang@dlut.edu.cn

术的进一步发展和应用. 本文基于 SiO_2 气凝胶多孔性、大比表面积和高孔隙率的特点 (Hüsing *et al.*, 1998) 利用溶胶-凝胶法制备出 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化材料. 在此基础上, 以自然太阳光为光源, 系统考察了 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂对 DNP 的光催化降解性能, 以期望提高 TiO_2 对有机污染物的吸附性能和光催化活性, 为拓展 TiO_2 光催化材料的应用范围和领域提供方法与途径.

2 实验部分 (Experimental)

2.1 试剂和仪器

2.1.1 试剂 正硅酸乙酯 (A. P, 天津市科密欧化学试剂开发中心)、钛酸四丁酯 (C. P, 国药集团化学试剂有限公司)、2,4-二硝基酚 (C. P, 天津瑞泰精细化工有限公司)、冰乙酸 (A. R, 南京化学试剂厂)、氨水 (A. R, 沈阳市联邦试剂厂)、硫酸 (A. R, 沈阳市联邦试剂厂)、氢氧化钠 (A. R, 天津市津沽工商业公司)、正己烷 (A. R, 天津市天河化学试剂厂)、无水乙醇 (G. R, 天津市富宇精细化工有限公司), 实验中所有用水均为去离子水.

2.1.2 仪器 D/MAX-2000 型 X 射线衍射粉末仪 (日本理学公司, Cu 靶, $K\alpha$ 射线 $\lambda = 1.54184 \text{ \AA}$, 电压 40 kV, 电流 30 mA); TECNAI G220 S-TWIN 型高分辨透射电子显微镜 (美国 FEI 公司); Avatar 360 型傅立叶变换红外光谱仪 (美国 Nicolet 公司, KBr 压片); UV-1201 紫外-可见分光光度计 (北京 Rayleigh 分析仪器有限公司); Delta320-S 型 pH 计 (梅特勒·托利多仪器有限公司); AR-5120 型电子精密天平 (奥豪斯国际贸易有限公司).

2.2 催化剂的制备

2.2.1 常压制备 SiO_2 气凝胶 室温下, 将 TEOS、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 和 H_2O 按摩尔比 1:5:6 混合均匀, 充分搅拌 30 min, 用 CH_3COOH 调节溶液 pH 约为 2.68, 持续搅拌 3 h, 得到无色透明的 SiO_2 溶胶. 静置片刻, 用 $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨水调节溶液 pH 至 5~6, 搅拌直至凝胶. 在 50°C 下, 将醇凝胶陈化 24 h 后进行表面改性, 依次用 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 浸泡 24 h, TEOS 和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 混合液 ($V_{\text{TEOS}}:V_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 1:1$) 浸泡 48 h, 正己烷进行溶剂替换 48 h. 最后, 除去液体, 常压下放入 80°C 的真空干燥箱缓慢烘干得到 SiO_2 气凝胶 (Aravind *et al.*, 2009; 史非等, 2005).

2.2.2 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶光催化剂制备 将一定体积 $\text{Ti}(\text{OBu})_4$ 、 CH_3COOH 和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 溶液混合均匀

至磨口三角瓶中, 加入不等量的 SiO_2 气凝胶粉末, 超声分散 30 min. 同时在恒压滴液漏斗中加入一定比例的 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 CH_3COOH 和 H_2O 混合液. 在剧烈搅拌下, 将恒压漏斗中的混合溶液逐滴滴入三角瓶. 滴加完毕, 继续搅拌 1 h, 得到醇凝胶. 把凝胶置于常温下陈化 12 h 后, 100°C 条件下进行真空干燥, 再于马弗炉中 500°C 焙烧 2 h, 即可得到 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂.

2.3 光催化降解 DNP 实验

反应器为 Pyrex 锥形反应瓶, 将其置于大连理工大学化学楼顶层室温下进行光催化降解 DNP 实验. 光源选择大连地区 5~6 月份晴朗天气 10 点至 13 点之间的自然阳光. 在此时间段内阳光强度的波动最小, 平均强度为 $0.526 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. 所有光催化实验如无特殊说明均为量取 75 mL 初始浓度为 $36.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 DNP 水溶液, 溶液 pH 值 4.62, 催化剂用量 $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 加入到 Pyrex 锥形反应瓶中, 避光条件下持续振荡 1 h 以达到吸附-脱附平衡. 达到吸附-脱附平衡后, 立即取样, 测定 DNP 在 $\lambda = 359 \text{ nm}$ 处的起始吸光度值 A_0 . 然后将锥形瓶置于太阳光充足的地方进行光照降解实验, 每隔一定的时间取 4 mL 试样, 离心分离, 取上层清液测定吸光度值 A . 利用测得的吸光度数值, 由 DNP 标准曲线计算出 DNP 浓度 (C). 根据光催化降解前后 DNP 浓度变化来评价光催化剂的催化性能.

3 结果 (Results)

3.1 催化剂的表征结果

3.1.1 X 射线衍射 (XRD) 图 1 为纯 TiO_2 和 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂经 500°C 和 750°C 焙烧后的 XRD 谱图. 从图中可以看出, 500°C 焙烧后, 纯 TiO_2 和 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合材料均具有锐钛矿型 (101) 晶面特征衍射峰 ($2\theta = 25.4^\circ$), 而且峰型清晰、尖锐, 结晶度较好. 750°C 焙烧后, 纯 TiO_2 表现出金红石型 (110) 特征衍射峰 ($2\theta = 27.6^\circ$), 而 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合物依然具有锐钛矿型特征衍射峰. 这说明硅气凝胶的加入能够抑制 TiO_2 由锐钛矿向金红石相的转变, 提高 TiO_2 光催化剂的热稳定性. 与图 1c 相比较, 图 1a 衍射峰较宽, 这种微弱的宽化现象是由晶粒尺寸变小所引起的. 此外, 随着焙烧温度的升高, 衍射峰更尖锐, 结晶程度更加完善, 这些都在一定程度上有利于提高 TiO_2 的光催化活性.

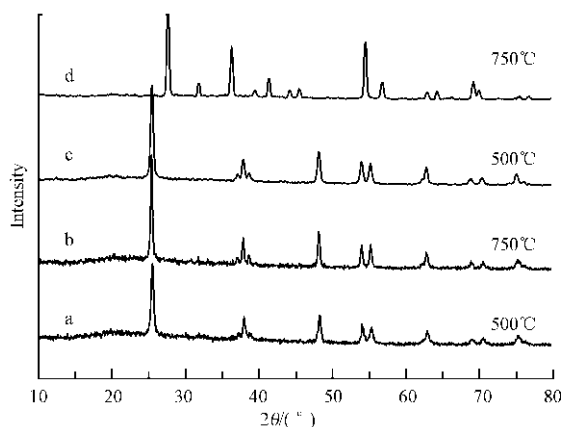


图1 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂(a, b)和纯 TiO_2 (c, d) XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ aerogel composite samples (a, b) and pure TiO_2 (c, d)

3.1.2 透射电镜(TEM) 图2为 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂的 TEM 图。从图中可见,复合纳米粒子大小分布并不均匀,平均粒径约为 15 ~ 25 nm。微粒表面可明显观察到少量孔洞,这是由 TiO_2 颗粒和 SiO_2 气凝胶相互聚结而成的多孔网络结构,它有利于增强对有机污染物的吸附作用。

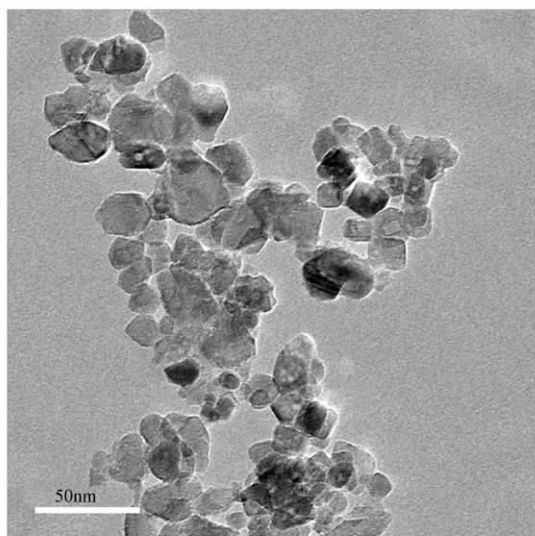


图2 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂 TEM 图

Fig. 2 TEM image of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ aerogel composite photocatalyst

3.1.3 傅立叶红外光谱(FT-IR) 图3为纯 TiO_2 和 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂的 FT-IR 谱图。3430 cm^{-1} 和 1640 cm^{-1} 处产生的特征吸收峰对应于 O—H 的伸缩振动和弯曲振动,表明光催化剂粒子表面存在少量吸附水或残留有机物。1070 cm^{-1} 和 472 cm^{-1} 出现的特征吸收峰分别为 Si—O—Si 和

Ti—O—Ti 键的伸缩振动峰,949 cm^{-1} 处为 Ti—O—Si 键的振动吸收峰(Holland *et al.*, 2000),由两者对比,可以确定掺杂的 SiO_2 进入 TiO_2 纳米粒子表面, TiO_2 和 SiO_2 之间发生键合作用,而不是简单的物理吸附作用。

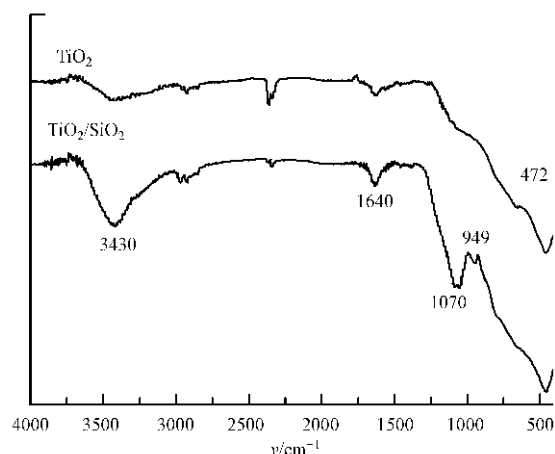


图3 纯 TiO_2 和 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂 FT-IR 图

Fig. 3 FT-IR spectra of pure TiO_2 and $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ aerogel composite photocatalyst

3.1.4 等电点测定(pH_{zpc}) 利用 pH 漂移法测定 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂的等电点(Jia *et al.*, 2002)。移取 11 份 50 mL 0.05 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 水溶液,氮气吹脱至体系 pH 值稳定,除去溶液中的二氧化碳。用 HCl 或 NaOH 溶液调节溶液 pH 值(2.0 ~ 12.0),记做 $\text{pH}_{\text{initial}}$ 。分别加入 0.15 g 催化剂,振荡一定时间后,静置 24 h,测定体系的 pH 值,记做 pH_{final} 。以 $\text{pH}_{\text{initial}}$ 为横坐标, pH_{final} 为纵坐标作图。其中, $\text{pH}_{\text{initial}}$ 与 pH_{final} 相等时所对应的 pH 值就是其等电点。由图4可知, $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂的

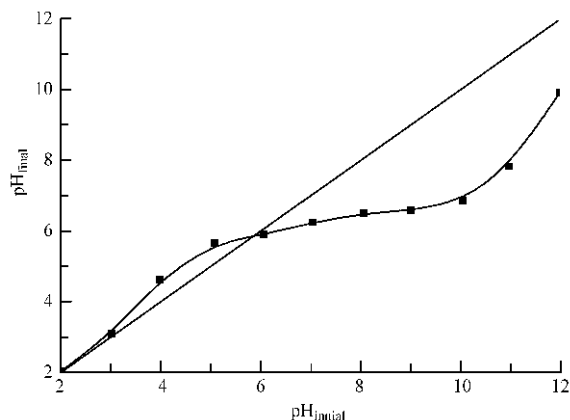


图4 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂等电点测定

Fig. 4 pH_{zpc} graph of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ aerogel composite photocatalyst

等电点为 5.96.

3.2 光催化降解实验结果

3.2.1 SiO_2 气凝胶复合量的影响 图 5 为含不同 SiO_2 气凝胶质量分数的复合光催化剂对 DNP 溶液的光催化降解情况. 从图中可见, 复合 1% 和 7.5% SiO_2 气凝胶的 TiO_2 光催化降解效果都比纯 TiO_2 好, 后者催化活性提高的更明显. 这是因为复合材料比表面积增大, 有利于直接吸附污染物. 另外, 高的锐钛矿结晶度也有利于光生电荷分离, 使其具有更强的氧化还原能力. 当掺杂量达到 20% 时, 吸附量增加, 但是光催化降解率降低. 这可从以下两方面解释: ①硅气凝胶含量增多时, 吸附能力增强, 过多的分子吸附在复合催化剂表面会导致催化剂部分活性位点被占据, 从而影响 $\cdot\text{OH}$ 的产生, 降低光催化活性能力; ② SiO_2 气凝胶含量升高, 相应复合材料中 TiO_2 百分比降低. 这样, 起光催化作用的活性 TiO_2 分子数目减少, 影响其对光能的充分利用, 减少光生电子-空穴和活性羟基自由基的产生. 因此, 硅气凝胶的复合量有一个最佳值, 本体系确定的复合光催化剂中 SiO_2 气凝胶质量分数为 7.5%.

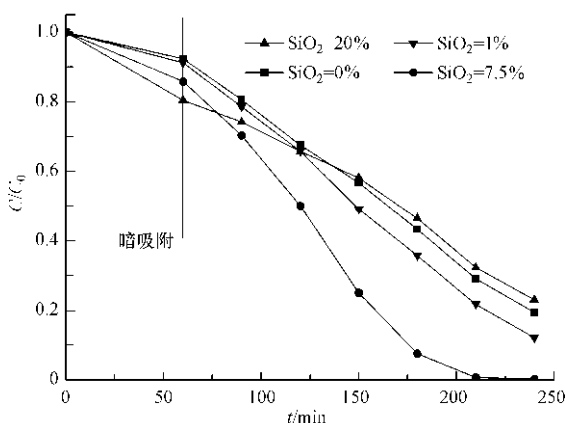


图 5 SiO_2 气凝胶含量对 DNP 光催化降解反应的影响

Fig. 5 Effect of amount of SiO_2 aerogel doped into the composite photocatalyst on the photocatalytic degradation of DNP

3.2.2 溶液初始 pH 值的影响 在光催化氧化反应中, pH 值影响催化剂粒子表面电荷和污染物分子在催化剂表面的吸附行为, 是影响光催化降解反应的重要因素. 图 6 为溶液初始 pH 值不同时的 DNP 光催化降解情况. 由图可知, 弱酸性条件下有利于 DNP 的光催化降解, 强酸或碱性条件下均不利于其降解. 当 pH 值为 4.62 时, 120 min 后 DNP 的降解率已达到 90%, 此时溶液未经酸碱调节, 为原始溶液 pH 值; pH 值为 9.48 时, 180 min 光照后降解率只有

60% 左右. 这主要是由催化剂的等电点和 DNP 的 pK_a 值决定的, $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂的等电点为 5.96, DNP 的 pK_a 值 4.09 (Rincón *et al.*, 2004). 当溶液 pH 值小于 5.96 时, 催化剂表面呈正电性, 此时 DNP 主要以分子形式存在, 二者可以通过静电引力产生吸附作用. pH 值高于 5.96 时, 催化剂表面呈负电性, DNP 分子发生解离, 主要以硝基酚负离子形式存在, 两者相互排斥, 吸附率下降, 光催化活性降低. 另外, TiO_2 表面 $\cdot\text{OH}$ 的产生数量也受溶液 pH 值的影响, 强酸或强碱对于 $\cdot\text{OH}$ 的产生都是不利的.

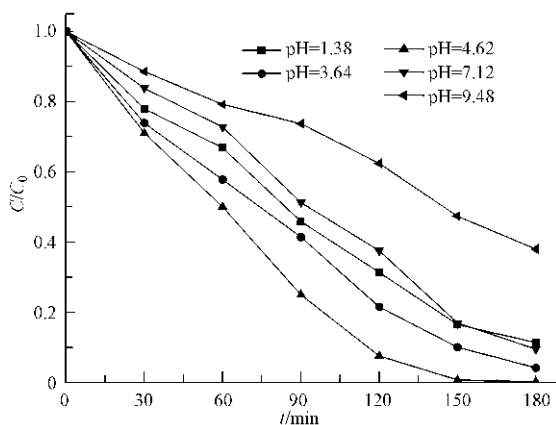


图 6 pH 值对 DNP 光催化降解反应的影响

Fig. 6 Effect of pH on the photocatalytic degradation of DNP

3.2.3 催化剂用量的影响 图 7 表示 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂投加量对 DNP 光催化降解反应的影响. 可以看出, DNP 降解率与催化剂的投加量并不成正比关系. 当催化剂用量从 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, DNP 降解率逐渐增大. 这是因为参加反应

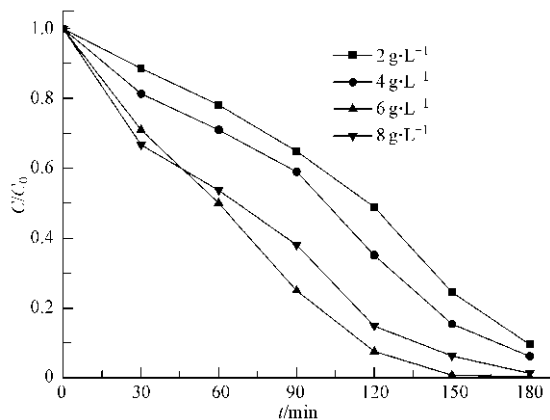


图 7 催化剂用量对 DNP 光催化降解反应的影响

Fig. 7 Effect of catalyst dosage on the photocatalytic degradation of DNP

的催化剂粒子增多,吸附作用和·OH的产生速率都提高.增加催化剂投加量至8 g·L⁻¹时,起初30 min降解率有所提高,继续光照,DNP降解率反而下降.这是由于增加催化剂的量能够吸附更多的DNP分子,光照30 min时,反应还处于慢速反应阶段,此时吸附量占DNP浓度下降的主要部分.随着光照时间延长,反应进入了快速阶段,产生光量子数目多少将成为影响降解率的主要因素.过多催化剂存在会增大溶液浊度,对光产生散射作用,光的穿透能力减弱.同时,催化剂增多会导致粒子团聚,有效活性位点减少,光催化活性降低.综合考虑,本实验确定催化剂用量为6 g·L⁻¹.

3.2.4 DNP降解过程的光谱分析 在光催化降解过程中DNP溶液的紫外-可见吸收光谱变化如图8所示.DNP主要在近紫外区有特征吸收,200~300 nm范围内有弱吸收带,最大吸收波长在359 nm.这可以从其结构上得到解释,由于苯环主要在近紫外区具有精细结构的B带特征吸收带,但在极性溶剂中其精细结构不明显,所以200~300 nm出现弱的吸收峰.当苯环上有两个发色团—NO₂取代时,发生了n-π共轭效应,使苯的B吸收带发生红移,且有助色团—OH的作用,也会使苯环的E带和B带发生红移,吸收峰强度增加,使DNP的最大吸收在359 nm.从图中可以看见,吸收峰强度随着反应的进行逐渐下降,吸光度减小.反应150 min后,吸收峰几乎消失,这表明硝基酚结构被破坏.同时,化合物浓度的大小可以通过光谱图中峰的吸收强度来衡量,吸收强度越弱,化合物浓度越低.可见,DNP浓度逐渐降低,说明DNP溶液在光催化过程中逐渐降解.

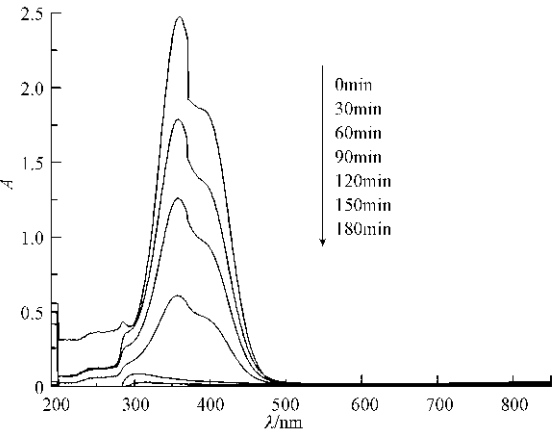


图8 不同反应时间DNP的紫外-可见吸收光谱

Fig. 8 UV-vis absorption spectra of DNP at different reaction times

3.2.5 DNP初始浓度的影响及动力学研究 当反

应物浓度较低时,TiO₂光催化反应遵循经典的Langmuir-Hinshelwood模型,符合准一级反应动力学.本实验考察了DNP溶液初始浓度对光催化反应的影响,从而对TiO₂/SiO₂气凝胶复合光催化剂降解DNP动力学进行研究.降解过程以表观一级动力学方程 $\ln(C_0/C) = k_{app}t$ 进行拟合,直线斜率表示该光催化反应表观反应速率常数 k_{app} ,结果见图9和表1.可以看出,TiO₂/SiO₂气凝胶复合物光催化降解DNP的反应符合准一级反应动力学.DNP的降解速率是随着初始DNP浓度的增大而降低,表现在反应表观速率常数 k_{app} 逐渐减小.这是因为随着DNP初始浓度增大,紫外光穿透溶液能力减弱,造成激发光催化反应的能量降低,参与光催化反应的光量子数目减少.同时,溶液初始浓度增大意味着更多DNP分子被吸附在催化剂表面,导致光催化剂有效活性部位减少,降解效率下降.

表1 不同浓度DNP光催化降解曲线拟合的可决系数
Table 1 The corresponding curve fitting parameters for the photocatalytic degradation of DNP at different initial concentrations

C_0 (DNP) /(mg·L ⁻¹)	表观速率常数 k_{app} /min ⁻¹	可决系数 R^2	半衰期 $t_{1/2}$ /min
11.21	0.05277	0.9861	2.94
24.00	0.03091	0.9872	3.48
33.83	0.02568	0.9622	3.66
56.48	0.00799	0.9100	4.83

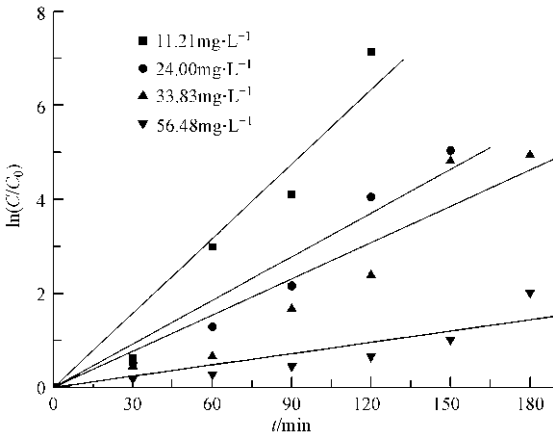


图9 DNP初始浓度对光催化降解反应的影响

Fig. 9 Effect of initial concentration of DNP on the photocatalytic degradation reaction

3.2.6 催化剂重复利用 将每次光催化实验后的催化剂经过过滤、洗涤和烘干后再回收,考察其循环使用性能.结果如图10所示.可以看出,催化剂循环使用3次,催化剂依然保持高的光催化活性,DNP

降解率均在 90% 以上. 第 4 次循环使用时降解率下降较多, 仅为 81.41%. 这主要是因为随着使用次数的增加, 吸附在催化剂表面上的有机物增多, 占据了催化剂的活性位点, 导致光催化活性下降. 将循环使用 4 次后的催化剂经过 300 °C 焙烧 1 h 后再进行光催化降解实验, 结果显示催化剂活性与首次使用催化剂时差别不大. 可见, 该催化剂高温焙烧后具有可再生性. 这是由于吸附在催化剂表面的有机物在高温条件下发生分解反应, 恢复了催化剂的活性部位. 但是, 多次对催化剂进行高温处理, 会导致催化剂比表面积下降, 活性位被钝化, 最终使催化剂丧失活性. 所以, $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 气凝胶复合光催化剂在一定范围内具有良好的可回收和可再生性.

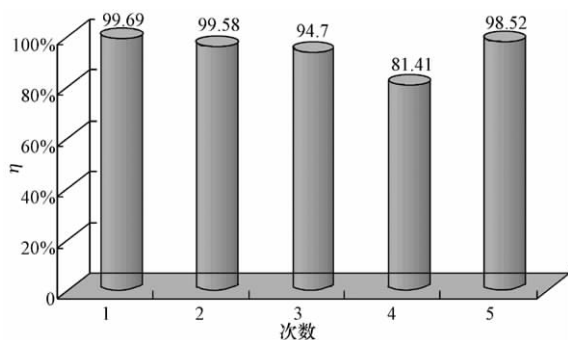


图 10 催化剂的重复使用对光催化降解 DNP 的影响

Fig. 10 Efficiency of the photocatalyst after repetitive use

4 结论(Conclusions)

1) 最佳催化条件下, 太阳光照射 150min 后 DNP 降解率达到 99.69%, 较纯 TiO_2 催化效率有明显提高. 2) SiO_2 气凝胶的掺入增大催化剂粒子的比表面积, 有利于对污染物的吸附和增加反应速率, 提高光催化活性. 3) 催化剂经多次循环使用仍具有较高的催化活性. 因此, 该复合光催化剂在处理硝基酚类废水方面具有潜在的应用价值.

责任作者简介: 王慧龙(1971—), 男, 工学博士, 副教授, 辽宁省优秀青年骨干教师. 主持国家自然科学基金等省部级以上科研项目多项, 在国内外学术刊物发表研究论文 60 余篇, 被 SCI 和 EI 检索收录 20 余篇, 主编研究生教材 1 部, 参编本科生教材 5 部.

参考文献(References):

- Aravind P R, Shajesh P, Mukundan P. 2009. Silica-titania aerogel monoliths with large pore volume and surface area by ambient pressure drying[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 52(3): 328-334
- 常江, 陈晖. 2009. 纳米 TiO_2 光催化降解硝基酚类污染物动力学及机理的研究[J]. *环境工程学报*, 3(1): 43-46
- Chang J, Chen H. 2009. Photodegradation of nitrophenols in UV/ TiO_2 suspension system: mechanistic and kinetic investigations [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 3(1): 43-46 (in Chinese)
- Chen J, Eberlein L, Langford C H. 2002. Pathways of phenol and benzene photooxidation using TiO_2 supported on a zeolite [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology (A: Chemistry)*, 148(1/3): 183-189
- 菅秀君, 刘福胜, 刘莹, 等. 2000. 苯乙烯精馏阻聚剂的研究进展[J]. *精细石油化工* (3): 46-48
- Jian X J, Liu F S, Liu Y, et al. 2000. The research progress in polymerization inhibitors for styrene rectification [J]. *Speciality Petrochemicals*, (3): 46-48 (in Chinese)
- Holland M A, David M P, Gavin M. 2000. Synthesis, characterisation and performance of $(\text{TiO}_2)_{0.18}(\text{SiO}_2)_{0.82}$ xerogel catalysts [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 10(11): 2495-2501
- Hüsing N, Schubert U. 1998. Aerogels-aairy materials: chemistry, structure, and properties [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 37(1/2): 23-45
- Jia Y F, Xiao B, Thomas K M. 2002. Adsorption of metal ions on nitrogen surface functional groups in activated carbons [J]. *Langmuir*, 18(2): 470-478
- Rincón, Pulgarin A G. 2004. Effect of pH, inorganic ions matter and H_2O_2 on E. coli K12 photocatalytic inactivation by TiO_2 . Implications in solar water disinfection [J]. *Applied Catalysis (B: Environmental)*, 51(4): 283-302
- 史非, 王立久, 刘敬肖, 等. 2005. 介孔 SiO_2 气凝胶的常压干燥制备研究[J]. *无机化学学报*, 21(11): 1632-1636
- Shi F, Wang L J, Liu J X, et al. 2005. Synthesis of mesoporous silica aerogels via ambient pressure drying [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 21(11): 1632-1636 (in Chinese)
- Uberoi V, Bhattacharya S K. 1997. Toxicity and degradability of nitrophenol in anaerobic systems [J]. *Water Environmental Research*, 69(2): 146-156
- Wang H, Wang H L, Jiang W F, et al. 2009. Photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol (DNP) by multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)/ TiO_2 composite in aqueous solution under solar irradiation[J]. *Water Research*, 43(1): 204-210