

TiO₂ 光催化氧化技术处理环境污染物的研究进展

齐 建¹ 陈 亮² 周 璇³

(1. 中国船舶重工集团公司第七四研究所, 上海 200031; 2. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 200051; 3. 九江市环境保护局, 江西九江 332008)

摘要 阐述了 TiO₂ 光催化氧化法的原理、TiO₂ 催化剂的制备以及粉末型和负载型两种形态的 TiO₂ 在光催化氧化有机污染物方面的应用情况, 指出粉末型 TiO₂ 主要应用于废水处理, 负载型 TiO₂ 主要应用于废水处理、垃圾填埋场渗滤液处理和环境净化。粉末型 TiO₂ 的研究发展方向是通过改性以提高其活性和可应用性, 如表面沉积贵金属、表面耦合、表面敏化、过渡金属掺杂等, 负载型 TiO₂ 的研究方向是通过改性以提高催化活性, 选择合适的载体, 充分发挥载体的优势, 加强固定态光催化氧化技术与其他技术的联用, 利用太阳能作用光源等。

关键词 二氧化钛; 光催化氧化; 污染物

中图分类号: X506 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2006)01-0015-04

Advances in research of TiO₂ photo-catalytic oxidation technique for treatment of environmental pollutants

QI Jian¹, CHEN Liang², ZHOU Xuan³

(1. The 704 Institute of China Shipping Industry Corp., Shanghai 200031, China; 2. Department of Environmental Science & Engineering, Donghua University, Shanghai 200051, China; 3. Environment Protection Bureau of Jiujiang City, Jiujiang 332008, China)

Abstract The mechanisms of TiO₂ photo-catalytic oxidation technique, preparation of catalyst and application of both suspended and immobilized TiO₂ to the treatment of organic pollutants were introduced. It is presented that suspended TiO₂ is mainly used in wastewater treatment, while immobilized TiO₂ can be used in the treatment of wastewater and leachate from landfill and the purification of environment. The development tendency of suspended TiO₂ is to improve its activity and application to the surface deposition of heavy metals, surface coupling, surface sensitization, and intermingle of transition metal. The research tendency of immobilized TiO₂ is to improve its catalytic activity, to choose suitable carrier and make the best of it, to strengthen the combination between photo-catalytic oxidation and other techniques, and to use solar energy as light source.

Key words titanium dioxide; photo-catalytic oxidation; contaminant

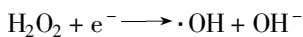
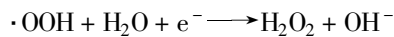
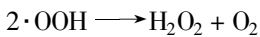
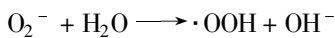
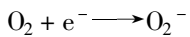
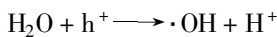
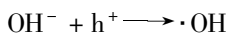
光催化氧化技术作为一种高级氧化技术日益受到国内外学者的关注^[1-4]。几乎所有的有机物在光催化作用下可以完全氧化为 CO₂, H₂O 等简单无机物。光催化氧化剂中尤以金属氧化物半导体 TiO₂ 最为典型。目前国内外报道的利用 TiO₂ 催化氧化有机污染物技术中, 主要是利用分散相的 TiO₂^[5, 6] 和固定相的 TiO₂^[7, 8]。利用半导体催化剂进行有机物氧化的光催化氧化对环境污染问题中突出的毒性大、难生物降解的直链烃类、卤代芳香烃, 如染料、农

药、油类等物质具有很好的氧化分解作用, 能处理多种有机污染物。此外, 又由于光催化反应具有反应条件温和、设备简单、二次污染小、易于操作控制、对低浓度污染物具有很好的去除效果等优点, 因此, 半导体光催化反应技术已成为污染控制化学研究的一个热点, 是目前光化学方法用于污染控制的诸多研究中最活跃的领域。本文较全面地综述了两种形态 TiO₂ 光催化降解有机污染物方面的研究进展, 并对今后光催化氧化技术的研究方向进行了探讨。

1 TiO₂ 的光催化氧化机理

目前对 TiO₂ 光催化的机理研究尚不成熟,一般认为光催化氧化法是以 n 型半导体的能带理论为基础。半导体粒子的能带结构一般都是由价带与导带构成,它们之间有禁带分开。价带上一般填满了电子,为低能状态,导带上为空但其为高能状态。当采用能量等于或大于半导体禁带宽度(带隙能)的光照射半导体时,价带电子被激发,越过禁带进入导带。在导带上产生带负电的高活性电子(e⁻),而在价带上留下带正电荷的空穴(h⁺),由此形成电子—空穴对,并向 TiO₂ 粒子表面迁移,最终产生具有强氧化能力的羟基自由基(·OH)和活性氧(O₂⁻),从而使有机化合物最终被降解为 CO₂ 和 H₂O。

反应式如下:



2 光催化剂 TiO₂ 的制备

2.1 粉末型 TiO₂ 的制备

目前,制备粉末型 TiO₂ 的方法很多^[9],可概括为气相法和液相法。以下介绍几种制备粉末型 TiO₂ 的常用方法。

a. 溶胶-凝胶法^[10,11]。溶胶-凝胶法是近年来被广泛采用的一种粉末型 TiO₂ 的制备方法。采用钛醇盐或钛的无机盐作为原料,经水解和缩聚得溶胶,再进一步缩聚得凝胶,凝胶经干燥、煅烧可得到粉末型的 TiO₂ 粒子。此法工艺简单,合成温度低(室温)。溶胶-凝胶法获得的 TiO₂ 粉末粒度小,分散性好,粉体具有较高的烧结活性。

b. 醇盐水解法^[12,13]。该法是利用钛醇盐能溶于有机溶剂并发生水解反应生成氢氧化物或氧化物沉淀的特性来制备 TiO₂ 超细材料的一种方法。利用该法合成的纳米粉体,颗粒分布均匀,性能优异,纯度高,形状易控制。缺点是原料成本昂贵,金属有机物制备困难,合成周期长。

c. 沉淀法^[14]。该法是利用某种化学反应,其溶液里的构晶离子由溶液中缓慢均匀地释放出来,加入的沉淀剂不是立刻与沉淀组分发生反应,而是

通过化学反应沉淀剂在整个溶液中缓慢生成。如以尿素为沉淀剂、水和 TiO₂ 为原料可制得粒径为 10~15 nm 的 TiO₂ 粉体。该法的特点是以生成沉淀剂的速度来控制过饱和度,从而控制离子的生成速度。生成的粉体 TiO₂ 均匀、致密、使用效果好,便于实现工业化生产。

d. 水热合成法^[15]。该法是利用化合物在高温高压水溶液中的溶解度增大、离子活度增强、化合物晶体结构转型等特殊性质,在特制的密闭反应容器里,以水溶液作反应介质,通过对容器加热,创造一个高温、高压的反应环境,使通常难溶或不溶的物质溶解并重结晶,从而制得相应的纳米粉体。该法的优点是:制得的超细产品纯度高,分散性好,晶型好且颗粒大小可控。但该法经历高温高压过程,对设备的材质和安全要求较严,而且产品成本较高。

2.2 负载型 TiO₂ 的制备

随着研究的深入,人们很快地发现悬浮态的半导体体系存在着催化剂难以回收、容易中毒、溶液中存在着高价阳离子时催化剂不易分散等缺点。这些缺点使得该体系难以成为一项实用的技术,于是人们把焦点转向固定态催化剂的研究和制备。Zhang Yin 等^[16]分别以石英砂、硅胶、玻璃粒子、玻璃纤维等作为固定床对 TiO₂ 光降解三氯乙烷进行了研究和比较,结果发现同分散相相比,降解率有所提高。硅胶效果最佳,降解率可达分散相的 3 倍。近两年,国内外在固定相方面的研究也相当活跃,而且结果表明效果都比分散相好。Sopyan 等的研究表明,以 sol-gel 法制备的 TiO₂/glass 薄膜降解气态乙醛比 TiO₂ 粉(Degussa P25)有效。Kazuhito 等^[17]也以此技术在石英试管上制得了 TiO₂ 薄膜,研究表明锐钛矿结构的 TiO₂ 明显较金红石型的催化活性高,同时发现薄膜具有很高的稳定性。目前研究的催化剂固定方法主要有两种:一种是直接将催化剂固定在反应容器内壁上;另一种是将催化剂固定在催化剂载体表面。所选用的催化剂载体大都具有质轻、比表面积大、能漂浮或固定于水中等特点,包括轻质玻璃球、玻璃纤维、砂、吸附剂(活性炭等)、硅胶等。常见的催化剂固定方法有阴极电沉积法、溶液浸渍法、溶胶-凝胶法、有机化学气相沉淀法等。

3 光催化剂 TiO₂ 的应用

3.1 粉末型 TiO₂ 的应用

利用分散相的 TiO₂ 粒子悬浮在水溶液中作为催化剂,在紫外光照射下进行光催化反应,由于催化剂与反应物接触表面大,所以降解效率高。一直以来,很多研究学者在实验中都采用粉末型 TiO₂ 光催化剂

研究其在一些难降解的有机污染物方面的应用。

在废水处理过程中, TiO_2 光催化剂在紫外光照射下能产生极具活性的羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 和活性氧 (O_2^-), 能有效地将废水中的有机污染物氧化分解并最终矿化为无害的 CO_2 , H_2O 和无机物。大量研究证明, 该技术可以对水中的染料、烃类、有机酸、酚类、表面活性剂、农药等污染物进行处理, 能彻底破坏有机物, 使反应物最终矿化为 CO_2 , H_2O 等无机小分子, 从而消除了其对环境的污染。崔兆杰等^[18]在 TiO_2 粉末悬浮体系内光催化降解模拟水样中的苯系物, 降解效率可达 93%, 加 H_2O_2 与 Fe^{3+} 后, 发现苯系物可完全被降解。张元广等^[19]采用溶剂热技术成功地合成了纳米 TiO_2 微球, 用此催化剂对含有甲基橙的溶液进行光催化降解, 脱色效果良好。冯良荣等^[20]用沉淀法制备得纳米 TiO_2 光催化剂, 研究了其光催化降解废水中的十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 的效果, 反应 5h 后, 化学需氧量去除率在 91% 以上。对酸性粒子元青染料液, 利用纳米 TiO_2 光催化氧化效果也不错, 降解率可达 92.3%^[21]。

3.2 负载型 TiO_2 的应用

a. 用于废水处理。不同于粉末型 TiO_2 光催化剂的是, 固定相 TiO_2 是将 TiO_2 负载于载体上, 这样用于废水处理中就解决了催化剂难回收、难循环利用的问题。魏宏斌等^[22]采用溶胶-凝胶法在光学纤维和玻璃纤维布上成功制备锐钛矿型 TiO_2 膜。在不同条件下光催化氧化饮用水中硝酸盐氮 ($\text{NO}_2\text{-N}$) 的研究表明, 所制得的膜具有较好的光催化活性。席北斗等^[23]研究以 TiO_2 为基本活性组分、空心玻璃珠为载体、硅酸钠为粘合剂的负载型催化剂制备技术, 对初始 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}}) = 400 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{PCP} - \text{Na}) = 10 \text{ mg/L}$ 的反应液处理后, COD_{Cr} 去除率大于 65%, PCP-Na 去除率大于 92%。

b. 用于处理垃圾填埋场渗滤液。罗建中等^[24]在做垃圾填埋场渗滤液降解实验中用现场采集的渗滤液原水和氧化沟出水实验, 结果发现 COD_{Cr} 去除率分别达到 80.6%, 77.3%, 色度去除率分别为 87.9% 83.3%。

c. 环境净化。 TiO_2 在环境净化方面已有广泛应用, 如水质净化方面已经产品化: 泄漏油处理用的油分解玻璃珠, 地下水、下水道污水处理用的有机氯化物催化剂, 防止水生生物附着用的玻璃纤维布。上述大部分制品都已商品化, 部分则正在开发中。

4 TiO_2 光催化氧化技术的研究发展方向

4.1 粉末型 TiO_2 的研究发展方向

粉末型 TiO_2 颗粒细小, 在废水处理中易流失, 回

收困难。因此, 对粉末型 TiO_2 催化剂进行一些改性, 以提高其活性及可应用性, 是今后的主要发展方向。

a. 表面沉积贵金属^[25, 26]。在 TiO_2 表面沉积贵金属, 对提高其光催化反应效率和选择性是很有效的。常用的贵金属有 Pt, Pd, Ag, Au, Ru, Nb 等。在 TiO_2 表面沉积适量的贵金属有助于载流子的重新分布, 电子从费米能级较高的半导体转移到较低的金属, 直至两者的费米能级相同, 从而形成俘获激发电子的肖特基势垒, 避免了电子空穴的负荷, 电子空穴得到了有效分离, 最终提高了光催化剂的光量子效率。如在载铂二氧化钛对 3B 艳红染料溶液光催化降解性能的研究中发现 TiO_2 表面负载适量的金属铂后, 对染料降解的催化活性有了明显的提高^[27]。

b. 表面耦合。耦合半导体是由两种不同禁带宽度的半导体复合而成的, 其互补性只能增强电荷分离, 抑制电子空穴的复合, 扩展光致激光波长范围, 从而显示出比单一半导体更好的稳定性。如 SnO_2 与 TiO_2 两者的能级不同, 光激发 TiO_2 产生的电子从较高的导带迁移至 SnO_2 的较低的导带。空穴的运动方向跟电子的运动方向相反, 光生空穴则从 SnO_2 的价带迁移至 TiO_2 的价带, 实现了电子和空穴的良好分离。

c. 表面敏化。敏化作用可以把电子注入半导体表面, 从而扩展光催化剂的激发波长的响应范围, 使之有利于降解有色化合物。实验研究表明, 一些普通染料、叶绿素、腐殖酸等常被用作敏化剂, 可在 TiO_2 表面得到完全或部分降解。

d. 过渡金属掺杂。在半导体中掺杂不同价态的金属离子, 不仅可以加强半导体的光催化作用, 还可以使半导体的吸收波长范围扩展至可见光区域。研究表明, Fe^{3+} , Mo^{5+} , Re^{5+} , Ru^{3+} , V^{4+} , Rh^{3+} 等能提高材料的光催化活性, Fe^{3+} 效果最佳。 Li^+ , Al^{3+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} , Nb^{3+} , Sn^{4+} 等则对光催化活性的影响较小^[28]。

4.2 负载型 TiO_2 的研究发展方向

对固定态的 TiO_2 不存在回收困难的问题, 由于其负载在载体上, 所以与污染物接触的比表面积较粉末相的 TiO_2 大大减小了, 除了同样对 TiO_2 进行适当的改性以提高催化活性以外, 选择合适的载体, 充分发挥载体的优势也是十分必要的。另外, 可以结合其他的一些处理污染物的方法, 使固定相光催化氧化技术与其他技术联用, 从而更有效地对污染物进行处理。

a. 半导体复合^[29]。复合半导体可分为半导体-绝缘体复合及半导体-半导体复合两种。绝缘体如

Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 等大多起载体作用。 TiO_2 负载于适当的载体后,可获得较大的表面结构和适合的孔结构,并具有一定的机械强度。另外,载体与活性组分间相互作用也可能产生一些特殊的性质。如由于金属离子的配位及电负性不同而产生过剩电荷,增加半导体吸引质子或电子的能力等,从而提高了催化活性。

b. 固定态光催化氧化技术与其他技术联用。由于水污染物特别是有机污染物种类繁多以及单一水处理技术本身的局限性,优化组合各种单一水处理技术,使之相互渗透、互为补充,组成高效和富于经济性的联用技术,已成为水处理技术发展的必然趋势。将固定态光催化氧化技术与紫外光照射、臭氧氧化、吸附剂吸附和生物处理等技术联用,可提高整体反应速率和效率。已有研究将固定态光催化氧化作为生物处理的后续处理方法,或与活性炭吸附法联用。固定态光催化氧化技术与其他技术联用,在饮用水的深度处理或难降解有机废水处理等方面有着广阔的应用前景。

c. 利用太阳光能作为光源。负载型固定态的 TiO_2 可以利用太阳能光源,根据催化降解机理, TiO_2 的带隙能为 3.2 eV,相当于波长为 387.5 nm 的光子能量,当它受到波长小于或等于 387.5 nm 的太阳光辐照后,处于价带的电子就被激发到导带,价带便生成空穴(h^+),所产生的(h^+)将吸附在 TiO_2 表面的 OH^- 和 H_2O 分子氧化成 $\cdot\text{OH}$ 自由基。热力学理论证明,这是可行的,因为该反应的氧化电位比 TiO_2 价带电位更负些;顺磁共振研究也证明,水体系中 TiO_2 表面存在大量 $\cdot\text{OH}$ 自由基,这样太阳光能暂时以化学能形式贮存起来,其中 $\cdot\text{OH}$ 作为强氧化剂,进一步将有机物降解,完成光能与化学能之间的转化。以太阳光作为非均相光催化的紫外光激发光源,用于染料废水处理,脱色效率高,在一般晴天气候条件下,2 h 内脱色效率在 80% ~ 93%,在阴天多云的气候条件下亦可达到 66%。

参考文献:

[1] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238: 38-45.
 [2] GAREY J H, LAWRENCE J, TOSINE H M. Photodechlorination of PCB'S in the presence of titanium dioxide in aqueous suspensions[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 1976, 16: 697-706.
 [3] WYNESS P, FKLANSNER J F, GASWAMI D Y, et al. Performance of nonconcentrating solar photocatalytic oxidation

reactor, part 2: Flat-plate Configuration[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1994, 116(6): 2-7.
 [4] 赵文宽. TiO_2 光催化反应及其在废水处理中的应用[J]. 上海环境科学, 1991, 10(4): 253-256.
 [5] 黄艳娥, 踞行松. 纳米二氧化钛光催化降解水中有机污染物的研究进展[J]. 化工环保, 2002, 22(1): 23-27.
 [6] 黄慧莉. 纳米 TiO_2 光催化降解染料溶液的研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(3): 140-143.
 [7] 席北斗. 负载型催化剂光催化氧化五氯苯酚钠的效果[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 41-44.
 [8] COLON G, HIDALGO M C, MACIAS M. Influence of residual carbon on the photocatalytic activity of TiO_2 samples for phenol oxidation[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, 43: 163-173.
 [9] 邵艳群, 唐电, 陈士仁. 纳米级二氧化钛的制备技术[J]. 氯碱工业, 1997(11): 35-40.
 [10] 余家国, 赵修建, 叶晓川, 等. 溶胶-凝胶法制备 TiO_2 纳米薄膜及其光催化性能的研究[J]. 光学技术, 1998(4): 17-19.
 [11] 李晓娥, 祖庸. 溶胶凝胶法制备超细二氧化钛[J]. 化工新型材料, 1997(10): 28-30.
 [12] 徐明霞, 徐廷献, 刘宁. 由 TiOSO_4 水解-沉淀制备 TiO_2 薄膜[J]. 硅酸盐学报, 1997, 25(4): 209-213.
 [13] 祝迎春, 周静芳, 张秀兰, 等. TiCl_4 控制水解制备量子尺寸 TiO_2 超微粒子[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 1997, 27(3): 29-32.
 [14] 胡晓力, 尹虹, 胡晓洪. 用均匀沉淀法制备纳米 TiO_2 粉体[J]. 中国陶瓷, 1997, 33(4): 5-10.
 [15] 李燕, 陈祖耀. 水热晶化法制备 TiO_2 纳米粉末[J]. 中国陶瓷, 1997, 33(3): 14-15.
 [16] ZHANG Y, CRITTENDEN J C, HAND D W. Fixed-bed photocatalysis for solar decontamination of water[J]. Environ Sci & Technol, 1994, 28(3): 435-442.
 [17] KAZUHITO H, TONOJI K. Photocatalytic reactions of hydrocarbons and fossil fuels with water-hydrogen production and oxidation[J]. J Phys Chem, 1984, 88(10): 4083-4088.
 [18] 崔兆杰, 高连存, 宋华. 悬浮态 TiO_2 光催化降解苯系物的方法研究[J]. 环境工程, 2002, 20(4): 75-79.
 [19] 张元广, 陈友存. 纳米 TiO_2 微球的制备及光催化性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(1): 60-63.
 [20] 冯良荣, 谢卫国, 吕绍结, 等. 纳米 TiO_2 对光催化降解 SDBS 的影响[J]. 水处理技术, 2002, 28(3): 149-151.
 [21] 白波, 赵景联, 冯霄. 纳米 TiO_2 光催化降解酸性粒子元青溶液的研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(3): 140-143.
 [22] 魏宏斌, 徐迪民. 固定相 TiO_2 膜的制备及其光催化活性[J]. 中国给水排水, 2002, 18(7): 57-59.
 [23] 席北斗, 孔欣, 刘纯新, 等. 加铂修饰型催化剂光催化氧化五氯酚[J]. 环境化学, 2001(1): 27-30.

(下转第 73 页)

此,解决好城镇供水、节水和污染防治工作,是建设节水型社会的重要任务。

4.3.1 城镇用水现状

据 2003 年统计,生活用水量 1.06 亿 m^3 ,人均用水量 317 m^3 ,低于全国 428 m^3 的用水水平。主要依靠城市自来水系统和单位、企业自建供水设施以及自备水源三部分。随着生活水平的提高和城镇化战略的实施,城镇生活用水量呈逐年增长的势头。全市居民住宅和第三产业排放的污水经过简易处理后可以用于灌溉和绿化,目前城市生活污水处理率达到 70%。

4.3.2 城镇节水对策

a. 做好城镇水资源规划。坚持可持续发展思想,根据水资源短缺现状及经济和社会发展对水的需求,量水而行,以水定供,以供定需,合理配置,有效保护,创造长期稳定的供水条件,科学确定境内水资源合理开发利用的方向、规模、时序,制定解决水资源供需矛盾的对策和措施,使水资源的开发步入良性循环的轨道,实现水资源的可持续利用。

b. 建立和完善全面的水管理体制和机制。形成总量控制与定额管理相结合的管理体制,政府调控、市场调节和公众参与的节水运行机制,水权交易及水市场运作机制,合理的水价形成机制,排污管理和调控机制,取水许可制度和水资源有偿使用制度。对防洪、供水、节水、排水、中水回用、污水处理等涉水事务进行统一管理,在水资源开发利用方面实行统一规划调配、统一发放取水许可证、统一征收水资源费、统一管理水量和水质,实行地表水与地下水统一管理、供水与排水统一管理、城市与农村统一管理,实现水资源的合理开发、高效利用、优化配置、全面节约、有效保护。

4.4 实现人与水的和谐统一

建设节水型社会应该有特定的文化基础和道德

体系,应该充分发挥公共传媒的作用,以提高公众对水资源状况的危机感和紧迫感,树立珍惜水、保护水、节约水的责任感,使节水意识深入人心。一方面激发公众的可持续发展意识,调动公众参与的积极性;另一方面建立公众参与的激励机制,不仅使他们能够参与监督节水型社会建设与可持续发展的决策过程,而且通过多种形式使节水型社会建设与可持续发展宣传与公众的切身利益结合起来,从与群众利益密切相关的事情做起,逐步调动广大公众的参与意识,营造浓厚的创建节水型社会的氛围。

5 结 语

通过鞍山市节水型社会的试点建设,对该地区的初始水权分配、水资源优化配置、水资源调配与管理、流域综合治理等方面进行探索。从城市建设的可持续发展出发,结合城市发展的总体规划,制定一系列用水、节水的规划,以实现用水在生产 and 消费上的高效合理,提高水资源的社会效益、经济效益和生态效益,以此支持区域经济社会的可持续发展,为相似地区的节水型社会建设提供经验。

参考文献:

- [1] 邵益生,宋兰合,张桂花.北方地区城市发展及其用水研究[J].中国水利,2000(5):36-37.
- [2] 刘学红.建立节水型社会实现可持续发展[J].甘肃水利水电技术,2003,39(3):181-182.
- [3] 何俊仕,郭兵托,张军锋.沈阳市水资源开发利用对策研究[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5-6):498-500.
- [4] 王紫雯,张向荣.城市生活用水多样化趋势与水资源的可持续利用[J].水资源保护,2004,20(4):15-18.

(收稿日期:2005-05-12 编辑:傅伟群)

(上接第 18 页)

- [24] 罗建中,齐水冰,操洲杏,等.光催化氧化法处理垃圾填埋场渗滤液的研究[J].环境污染与防治,2001,23(2):64-66.
- [25] 于向阳,程继健,杜永娟.TiO₂光催化抗菌材料[J].玻璃与搪瓷,2000,28(4):42-47.
- [26] 程沧沧,李太友,李华禄,等.载银 TiO₂光催化降解 2,4-二氯苯酚水溶液的研究[J].环境科学研究,1998,11(6):27-29.

- [27] 沈学优,李华英,陈群燕,等.载铂二氧化钛对 3B 艳红染料溶液光催化降解性能的研究[J].水处理技术,2001,21(7):33-36.
- [28] CHOI W K,TERMIN A,HOFFMANN M R. The role of metal ion dopants in quantum sized TiO₂: correlation between photo reactivity charge carrier recombination dynamics[J]. J. Phys. Chem.,1994,98(51):13669-13679.
- [29] 彭峰,任艳群.TiO₂-SnO₂复合纳米膜的制备及其光催化降解甲苯的活性[J].催化学报,2003,24(4):243-247.

(收稿日期:2004-08-06 编辑:徐娟)