

微波辅助光催化降解水中苯酚

洪军, 刘亚子, 杨绍贵, 孙成*

(南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 利用改装的家用微波炉、微波无电极灯 (EDLs) 和 TiO_2 催化剂研究了水溶液中苯酚的光催化降解效果。结果表明, 反应 30 min, 微波辅助光催化 (MAPC) 能去除 92% 的苯酚, 溶液总有机碳 (TOC) 减少 84%。MAPC 的最佳反应条件为: 苯酚初始浓度 10 mg/L, 微波功率 900 W, 反应液体积 50 mL, EDLs-3, 催化剂用量 1~4 g/L, 循环态流速 15 mL/min。MAPC 处理含酚废水具有较好的应用潜能。

关键词: 微波辅助; 光催化; 降解; 苯酚

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)09-1808-06

Microwave Assisted Photocatalytic Degradation of Phenol in Aqueous Solution

HONG Jun, LIU Ya-zi, YANG Shao-gui, SUN Cheng

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Experimental study on microwave assisted photocatalytic degradation of phenol in aqueous solution was carried out with modified domestic microwave oven, electrodeless discharge lamps (EDLs) and TiO_2 catalyst. Results showed that the removal rate of phenol in the MAPC process was 92% after 30 min reaction. Loss of total organic carbon (TOC) was 84%. The optimal conditions for the MAPC method were 10 mg/L phenol, 900 W MW output energy, 50 mL solution volume, EDLs-3, 1~4 g/L catalyst dosage and 15 mL/min of flowing velocity in the circulating mode. The MAPC process was promising in treating phenolic waste water.

Key words: microwave assisted; photocatalysis; degradation; phenol

微波在环境领域的应用十分广泛^[1]。微波具有加热快速、有选择性、清洁等特点, 受到许多环保学者的青睐^[2,3]。近年来, 微波激发无电极灯发光的现象受到国内外专家的重视, 并被用于环境领域研究^[4,5]。如 Horikoshi 等^[6]使用微波-无电极灯- TiO_2 体系光催化降解罗丹明 B, 0.05 mol/L 罗丹明 B 和混有 232 mg 的 TiO_2 水溶液, 流经一套装有微波无电极灯的双管石英等离子体光反应器, 反应 30 min, 罗丹明 B 发生大幅度降解, 溶液完全褪色, TOC 减少 62%, 并且发现微波可加快该体系 $\cdot\text{OH}$ 的产生, 促进罗丹明 B 的降解。艾智慧等^[7]利用无电极灯研究了水溶液中 4-氯酚的光降解, 微波-无电极灯体系中, 30 mg/L 4-氯酚反应 120 min 的降解率比单纯紫外光解体系提高 31%。微波无电极灯不但可以促进有机物的降解, 而且无正负电极, 不需要额外的电源供电, 整个体系占地面积小, 成本低。Müller 等^[8]预言, 使用无电极灯降解有机污染物的方法具有很大的发展潜力和应用价值。

苯酚是一种常见的有机污染物, 广泛存在于石油、化工、机械加工及印刷等行业废水中, 由于其对生物有明显的毒害作用, 故在环境治理中受到高度

重视。虽然有关苯酚的光催化降解研究较多, 但关于其微波辅助光催化降解的报道较少。本文利用微波辅助光催化降解装置和催化剂 TiO_2 研究了水溶液中苯酚的降解, 考察了影响苯酚的几种因素, 为微波辅助光催化在含酚废水处理领域的进一步研究和市场应用提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

钛酸四丁酯 $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{O}]_4\text{Ti}$ 、二乙醇胺 $\text{NH}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$ 均为化学纯试剂, 苯酚、无水乙醇为分析纯。

X 射线衍射仪 (ARL, X'TRA), 比表面测定仪 (Micromeritics, ASAP2020), 岛津 UV-2201 型紫外-可见分光光度计, 岛津 TOC-5000 测定仪, Heraeus 高速冷冻离心机, ZDZ-1 和 JD-3 型照度计 (上海嘉

收稿日期: 2005-10-11; 修订日期: 2005-12-15

基金项目: 江苏省科技厅公益专项 (BM2005711); 中国博士后基金项目 (2005038238); 江苏省博士后科研项目 (卡号 0211003403)

作者简介: 洪军 (1977~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: hongjun18888@163.com

* 通讯联系人, E-mail: envidean@nju.edu.cn

定学联仪表厂)。

1.2 二氧化钛催化剂(TiO_2) 的制备

溶胶-凝胶法制备 TiO_2 粉末^[9]。向一定体积的 $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{O}]_4\text{Ti}$ 中加入无水乙醇, 强烈搅拌 1 h 后, 加入 $\text{NH}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$ 作水解抑制剂, 继续搅拌 1 h 后, 边滴加蒸馏水和乙醇的混合物边搅拌(搅拌 2 h), 得到均匀、透明的溶液, 此溶液摩尔比为 $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{O}]_4\text{Ti} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{H}_2\text{O} : \text{NH}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2 = 1 : 26.5 : 1 : 1$ 。将制得的溶液 80°C 保温 12 h 后, 马弗炉中 550°C 热处理 1 h, 冷却、研磨, 得到白色固体粉末。

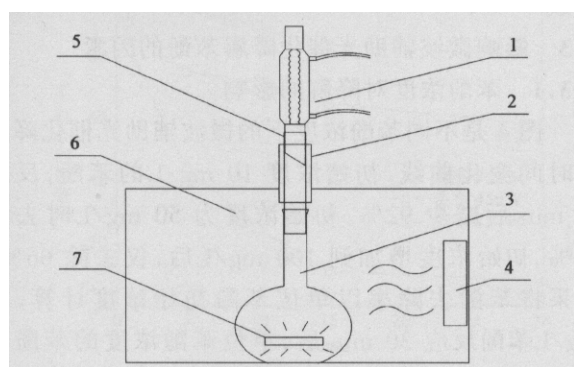
1.3 微波辅助光催化反应体系

1.3.1 无电极灯(EDLs)

一定规格的中空圆柱体(石英材料)抽真空后, 充入氩气和金属汞, 最后密封, 制备成 EDLs。EDLs-1 是 1 只规格 $10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的 EDL, EDLs-2 是 2 只 $10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的 EDL, EDLs-3 是 4 只 $10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的 EDL。EDLs 在微波场中受激发后, 可产生紫外-可见光谱, 光谱范围 $250 \sim 760\text{ nm}$ ^[5]。照度计测量光强, $250 \sim 400\text{ nm}$ 波段光强的测量结果为: 0 mW/cm^2 (EDLs-1), 2.2 mW/cm^2 (EDLs-2), 9.4 mW/cm^2 (EDLs-3)。

1.3.2 微波辅助光催化反应装置

改装家用微波炉(Midea, PJ23C-SC1), 如图 1 所示。微波炉开口处装有铝质套管, 防止微波泄漏; 连通管上置有球形冷凝管, 用以冷凝反应液。



1. 冷凝管; 2. 铝质套管; 3. 平底烧瓶; 4. 微波发生器;
5. 连通管; 6. 微波炉腔; 7. EDLs

图 1 微波辅助光催化反应装置

Fig. 1 Scheme of microwave assisted photocatalytic set-up

1.4 微波辅助光催化降解实验与分析测定

微波辅助光催化(MAPC): 平底烧瓶中加入含酚的溶液 50 mL、磁力搅拌子、催化剂 TiO_2 和 EDLs, 其中 EDLs 以悬浮的方式存在于溶液中, 然

后将烧瓶置于微波炉腔中, 接好冷凝装置。设定反应时间, 开启微波反应系统, 反应结束后, 待反应烧瓶冷却, 撤去冷凝装置, 取出烧瓶, 移液管移取部分反应液, 25°C 、 $15\,000\text{ r/min}$ 离心 15 min, 吸取上清液待测。

微波辅助直接光降解(MADP): 上述步骤中不加入 TiO_2 催化剂, 其它均相同。

微波/催化剂(MW/ TiO_2): MAPC 方法中不引入 EDLs, 其它均相同。

微波(MW): MAPC 方法中不引入 TiO_2 催化剂和 EDLs, 其它步骤相同。

紫外可见分光光度法测定上清液的苯酚浓度并计算去除率, 苯酚的测定波长为 270 nm ; TOC 分析仪测定溶液剩余 TOC, 并计算 TOC 去除率。

2 结果与讨论

2.1 TiO_2 的表征

制备的 TiO_2 经 X 射线衍射分析($\text{Cu K}\alpha$, $0.154\,06\text{ nm}$) 的图谱见图 2。 TiO_2 中锐钛矿的百分含量由公式 $X_A = \frac{1}{1 + \frac{I_R}{I_A \times K}}$ 计算(其中, A 代表锐钛矿, R 代表金红石相, I 为峰高或峰面积, K 取 0.79)。锐钛矿的相对百分含量为 85%, 金红石相 15%。

TiO_2 的平均粒径根据 Scherrer 公式 $D = \frac{0.89\lambda}{B \cos \theta}$ 计算(其中, λ 为 X 光的入射波长, B 最强衍射峰的半峰宽, θ 最强衍射峰对应的半衍射角)。 TiO_2 催化剂的粒径为 21 nm 。

BET 法测得 TiO_2 的比表面为 $36\text{ m}^2/\text{g}$ 。

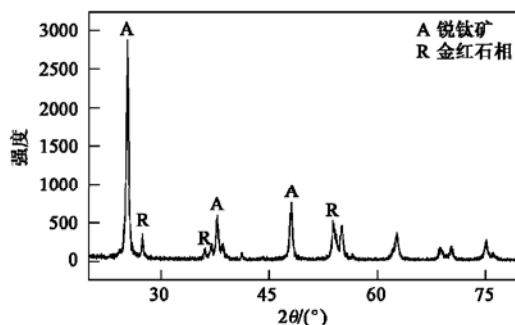
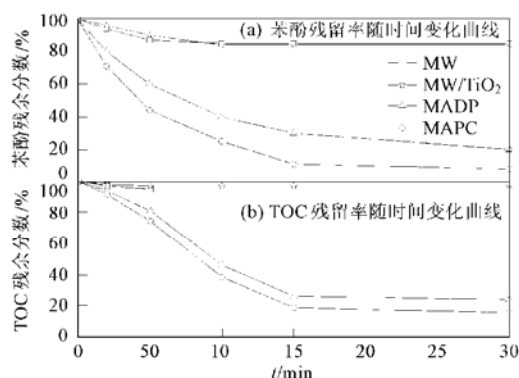


图 2 TiO_2 的 XRD 分析图谱

Fig. 2 XRD pattern of TiO_2

2.2 MW、MW/ TiO_2 、MADP 和 MAPC4 种条件下去除苯酚的效果

所用微波是频率 2.45 GHz 的电磁波,微波的热作用比较强,能使极性分子发生“变极效应”而迅速加热物质.实验中测量平底烧瓶中反应液的温度为 90~100℃.图 3 是 MW 和 MW/TiO₂ 条件下苯酚的去除效果.结果显示,30 min 内苯酚损失 14%,造成这种现象的原因可能是微波的热效应使苯酚挥发所致.另外,MW 对酚类物质的去除与 MW/TiO₂ 的相差不大,说明 TiO₂ 催化剂对苯酚的吸附较少.暗处吸附对比试验同样发现 TiO₂ 对苯酚的吸附量较小(<1%).

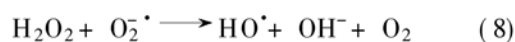
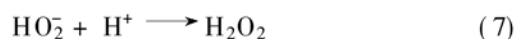
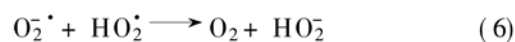
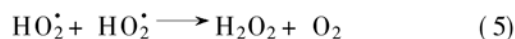
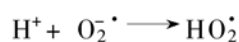
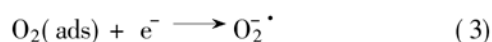
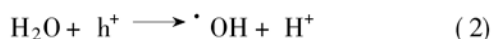
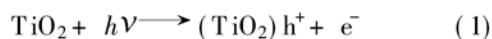


反应条件: $c_{\text{phenol}} = 10 \text{ mg/L}$; 微波功率 = 900 W;
 $c_{\text{TiO}_2} = 2 \text{ mg/L}$; 溶液体积 = 50 mL; 初始溶液 pH = 7; EDLs-3

图 3 MW, MW/TiO₂, MADP 和 MAPC 条件下苯酚的去除效果

Fig. 3 Comparison of removal of phenol in the MW, MW/TiO₂, MADP and MAPC processes

图 3 还列出了微波辅助直接光降解和微波辅助光催化降解苯酚的曲线. MADP 条件下, 反应 30 min 时苯酚含量减少 80%, TOC 减少 76%; 而 MAPC 条件下, 苯酚减少了 92%, TOC 减少 84%. MAPC 条件下去除苯酚的效果好于 MADP 的, 证明 TiO₂ 催化剂起到了一定的催化效果. TiO₂ 催化剂的带隙能为 3.2 eV, 相当于波长 387 nm 光子的能量. 当 TiO₂ 表面被 EDLs 产生的紫外-可见光中 $\leq 387 \text{ nm}$ 光照射时, TiO₂ 受激发形成电子-空穴对, 催化剂表面的 H₂O 分子可与空穴结合生成氧化能力很强的 $\cdot\text{OH}$ ($E = 2.8 \text{ V}$), O₂ 与电子反应形成过氧离子并经过一系列过程生成 H₂O₂, 最后也生成 $\cdot\text{OH}$, 如方程(1)~(9)所示. 最终, 苯酚被 $\cdot\text{OH}$ 氧化降解, 并且, 大部分转化为 CO₂ 和 H₂O.



此外, 图 3 显示, MADP 条件下苯酚的去除率达到 80%, 说明微波辅助的直接光降解作用十分显著. 由于苯酚可吸收 270 nm 的光子, EDLs 受微波激发后产生 200~750 nm 中的光子可使苯酚转化为激发态, 然后与 O₂ 生成电荷转移复合物并解离来实现氧化, 或者通过产生 $^1\text{O}_2$ 实现氧化.

微波辅助光催化反应是微波、无电极灯受激发产生的紫外-可见光和催化剂 TiO₂ 共同作用的过程, 所以, 微波效应对苯酚的光催化降解不容忽视. 由于微波场对催化剂 TiO₂ 的极化作用, 在 TiO₂ 表面可能产生许多悬空键和不饱和键, 从而在能隙中形成更多的缺陷能级, 提高 TiO₂ 的光激发电子跃迁几率; 微波电磁场在 TiO₂ 表面形成的缺陷, 可能成为电子或空穴的捕获中心, 从而降低电子与空穴的复合率; 微波场中水分子间的氢键结合被打断, 抑制了水在催化剂表面的吸附, 使更多的表面活性中心参与反应, 提高催化剂的活性; 另外, 微波辐射有可能使催化剂表面羟基的振动能级处于激发态的数目增多, 表面羟基被活化, 有利于羟基游离基的生成^[10,11].

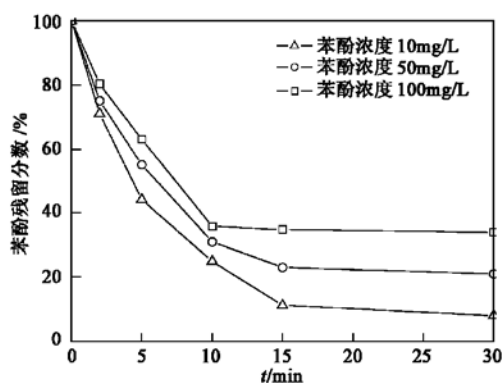
2.3 影响微波辅助光催化降解苯酚的因素

2.3.1 苯酚浓度对降解的影响

图 4 是不同苯酚浓度下的微波辅助光催化降解随时间变化曲线. 初始浓度 10 mg/L 的苯酚, 反应 30 min 后减少 92%, 初始浓度为 50 mg/L 时去除 79%, 初始浓度增加到 100 mg/L 后, 仅去除 66%. 如果将苯酚去除率以单位苯酚初始浓度计算, 10 mg/L 苯酚反应 30 min 后, 单位苯酚浓度的苯酚去除率为 9.2%, 50 mg/L 苯酚的单位苯酚浓度去除率为 1.58%, 而 100 mg/L 苯酚的单位苯酚浓度去除率为 0.66%. 由此看出, 随着目标物浓度增加, 微波辅助光催化降解苯酚的效果是降低的.

2.3.2 微波功率对苯酚降解的影响

微波功率对微波辅助光催化降解苯酚的影响见图 5. 当微波炉以最高功率(900 W)工作时, 苯酚的去除率为 98%, 如果以 100 W 为单位微波功率, 则单位微波功率下的苯酚降解率为 10.9%; 随着微波



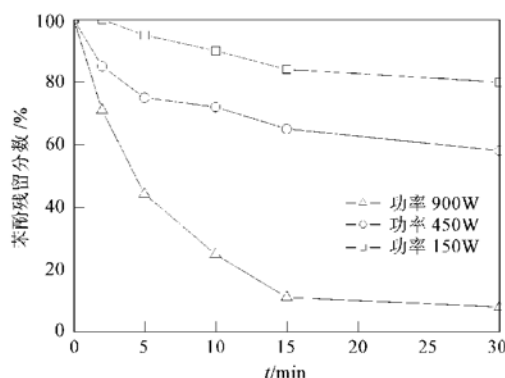
反应条件: 微波功率= 900 W; $c_{TiO_2} = 2 \text{ mg/L}$;

溶液体积= 50 mL; 初始溶液 pH= 7; EDLs 3

图 4 苯酚初始浓度变化对微波辅助光催化降解的影响

Fig. 4 Effect of initial concentration of phenol on phenol degradation in the MAPC process

功率降低为 450 W 时, 苯酚的降解率为 42%, 单位微波功率的苯酚降解率为 9.3%; 150 W 的苯酚降解率仅 20%, 单位微波功率的苯酚降解率为 13.3%。可以看出, 随微波功率由 900 W 减小到 450 W, 微波辅助光催化降解苯酚的效果变差, 这与微波功率减小, 致使 EDLs 的发光时间减少, 随之目标物受光照射的时间缩短有关。但是, 过低的微波功率使单位微波功率的苯酚降解率有所提高, 所以, 150 W 下的单位微波功率的苯酚降解率比 450 W、甚至 900 W 的要大。



反应条件: $c_{\text{phenol}} = 10 \text{ mg/L}$; $c_{TiO_2} = 2 \text{ mg/L}$;

溶液体积= 50 mL; 初始溶液 pH= 7; EDLs 3

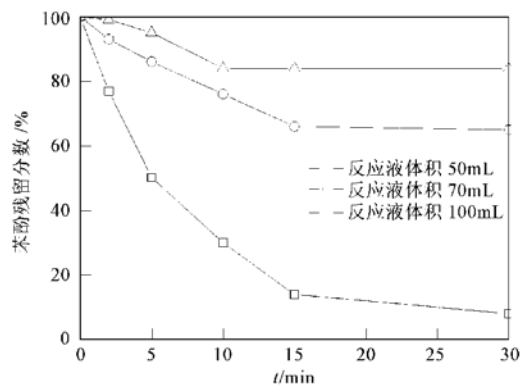
图 5 微波功率对微波辅助光催化降解苯酚的影响

Fig. 5 Effect of MW output energy on the degradation of phenol in the MAPC process

2.3.3 溶液体积对苯酚降解的影响

极性的物质吸收微波, 水溶液就能够强烈吸收微波能量; 同时, EDLs 也需要吸收微波而发光, 因

此, 同时存在于微波场中的 EDLs 和水会竞争吸收微波能量。这样, 反应液体积和 EDLs 数量的改变可能影响 EDLs 发光, 进而影响目标物的降解效果。



反应条件: $c_{\text{phenol}} = 10 \text{ mg/L}$; 微波功率= 900 W;

$c_{TiO_2} = 2 \text{ mg/L}$; 初始溶液 pH= 7; EDLs 3

图 6 反应液体积对微波辅助光催化降解苯酚的影响

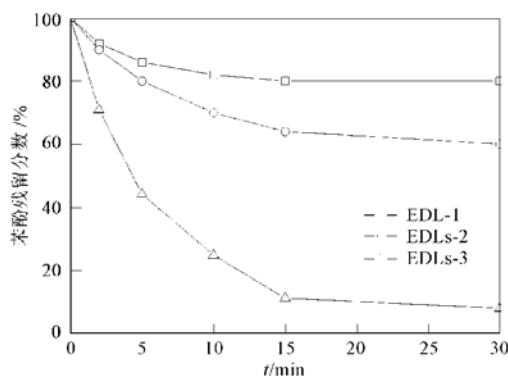
Fig. 6 Effect of solution volume on the degradation of phenol in the MAPC process

实验考察了 50、70 和 100 mL 反应液对微波辅助光催化降解苯酚的影响(图 6)。溶液体积为 50 mL 时, 苯酚去除率最大(92%), 单位溶液体积的苯酚降解率为 1.84%, 70 mL 溶液体积的苯酚去除率次之(35%), 单位溶液体积的苯酚降解率为 0.5%, 而 100 mL 的最小(16%), 单位溶液体积的苯酚降解率为 0.16%。所以, 随溶液体积增大, 微波辅助光催化降解苯酚的效果降低。实验同时测量了不同溶液体积下 EDLs 的发光强度(波段范围 250~400 nm), 其大小顺序为: 9.4 mW/cm^2 (50 mL) > 5.6 mW/cm^2 (70 mL) > 0 mW/cm^2 (100 mL)。可以看出, 随着溶液体积增加, EDLs 吸收微波能量减少, 导致发光强度减弱, 所以, 目标物的降解效果随之降低。

2.3.4 EDLs 对苯酚降解的影响

图 7 是不同数量 EDLs 对苯酚去除的影响。由图 7 可知, EDLs 3(4 只 EDL) 对苯酚的去除最多, 反应 30 min 去除率达到 92%; 随着 EDLs 数量减少, 苯酚的去除逐渐降低, EDLs 2(2 只 EDL) 的去除率为 40%, EDLs 1(1 只 EDL) 的仅为 20%。EDLs 数量变化时的光强(250~400 nm) 测量结果为 9.4 mW/cm^2 (EDLs 3) > 2.2 mW/cm^2 (EDLs 2) > 0 mW/cm^2 (EDLs 1)。这可以解释为: EDLs 数量变化可能影响它们对微波能量的吸收, 从而影响了 EDLs 发光, 较多的 EDLs 能产生较大的光强, 使目

标物发生更多的降解,因此,EDLs-3 条件下的苯酚去除率最大,EDLs-2 的次之,EDLs-1 的最小.



反应条件: $c_{\text{Ophenol}} = 10 \text{ mg/L}$; 微波功率 = 900 W;
 $c_{\text{TiO}_2} = 2 \text{ mg/L}$; 溶液体积 = 50 mL; 初始溶液 pH = 7

图 7 EDLs 对微波辅助光催化降解苯酚的影响

Fig. 7 Effect of EDLs on the degradation of phenol in the MAPC process

2.3.5 催化剂用量对苯酚降解的影响

考察了 TiO_2 催化剂的投加量(0~ 10 g/L)对微波辅助光催化降解苯酚的影响. 实验条件为: 初始苯酚浓度 10 mg/L, 微波输出功率 900 W, EDLs-3, 反应液体积 50 mL, pH = 7. 实验结果发现, 催化剂投加量为 1~ 4 g/L 能获得较好的效果, 苯酚去除率达 90% 以上, 少量(0~ 1 g/L) 或过多(4~ 10 g/L) 的投加量时, 效果有所下降, 约为 80%. 导致这种结果的原因可能是: 对于较少量的催化剂, 其受紫外光激发后, 产生相对较少的活性自由基($\cdot\text{OH}$) 而不足以氧化相对较多的目标物; 相反, 催化剂投加量过多, 溶液的光线穿透力被削弱, 部分 TiO_2 颗粒表面难以接受到光线照射, 产生的电子-空穴对数目减少, 所以对目标物的氧化能力减弱.

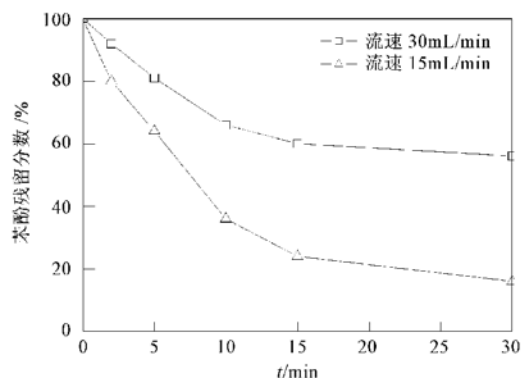
2.4 循环态下微波辅助光催化降解苯酚的效果

将微波辅助光催化反应装置进一步改装, 配置蠕动泵以实现反应液的循环流动. 调节蠕动泵, 改变反应液流速, 不同流速下苯酚的去除效果曲线如图 8 所示. 流速为 30 mL/min 时, 反应 30 min 苯酚可去除 44%; 而降低流速为 15 mL/min 时, 去除效果可提高到 84%. 这是因为, 低流速下, 溶液在反应器中的停留时间延长, 光催化反应更加充分, 因而获得了更高的降解效率.

3 结论

(1) 溶胶-凝胶法制备了 TiO_2 催化剂, 其锐钛

矿相对百分含量为 85%, 金红石相 15%, TiO_2 平均粒径 21 nm, 比表面积 $36 \text{ m}^2/\text{g}$.



反应条件: $c_{\text{Ophenol}} = 10 \text{ mg/L}$; 微波功率 = 900 W;

$c_{\text{TiO}_2} = 2 \text{ mg/L}$; 反应瓶中溶液体积 = 50 mL;

初始溶液 pH = 7; EDLs-3; 储液瓶溶液体积 = 1 L

图 8 循环态不同流速下微波辅助光催化降解苯酚曲线

Fig. 8 MAPC degradation of phenol at different flowing velocities in the circulating mode

(2) MW 和 MW/ TiO_2 条件下反应 30 min, 苯酚损失 14%, 这与微波热效应使苯酚挥发有关; MADP 条件下反应 30 min, 苯酚发生光化学降解, 苯酚减少 80%, TOC 减少 76%; MAPC 条件下, 反应相同时间, 苯酚降解 92%, TOC 减少 84%, 这是微波的非热效应、光化学降解和光催化降解共同的作用所致.

(3) 苯酚初始浓度、微波功率、溶液体积、无电极灯数量和催化剂用量均影响微波辅助光催化降解苯酚的效果. 当苯酚初始浓度为 10 mg/L、微波功率 900 W、溶液体积 50 mL、EDLs-3、 TiO_2 催化剂 1~ 4 mg/L 时有最佳效果, 苯酚降解率最大.

(4) 循环态 MAPC 条件下, 流速 30 mL/min 时, 反应 30 min 后苯酚可去除 44%; 流速为 15 mL/min 时, 去除率达到 84%. MAPC 方法具有装置简单、维护费用低、去除效果好等优点, 有望应用于含酚废水处理领域.

致谢: 本实验所用 EDL 由南海集团提供, 南京三乐微波技术发展有限公司的薛孔京工程师为实验用微波炉进行了改装, 在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 金钦汉, 戴树珊, 黄卡玛. 微波化学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] 王鹏. 环境微波化学技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 19~ 36.
- [3] 全燮, 薛大明, 赵雅芝, 等. 微波催化氧化处理难降解有机废

- 水的工艺与装置[P]. 中国专利: CN 1374260A, 2002-10-16.
- [4] 夏东升, 施银桃, 张钱根, 等. 微波诱导催化氧化-无极紫外光催化氧化联用技术处理印色废水 X-3B[J]. 武汉科技学院学报, 2004, **17**(4): 1~ 4.
- [5] Horikoshi S, Hidaka H, Serpone N. Environmental remediation by an integrated microwave/UV illumination technique [J]. J. Photochem. Photobiol. A: Chem., 2004, **161**: 221~ 225.
- [6] Horikoshi S, Hidaka H, Serpone N. Environmental remediation by an integrated microwave/UV-illumination method II. Characteristics of a novel UV-VIS-microwave integrated irradiation device in photodegradation processes [J]. J. Photochem. Photobiol. A: Chem., 2002, **153**: 185~ 189.
- [7] 艾智慧, 姜军清, 杨鹏, 等. 水溶液中 4-氯酚的微波辅助光化学降解[J]. 环境科学, 2004, **25**(4): 100~ 104.
- [8] Müller P, Klan P, Cirkva V. The electrodeless discharge lamp: a prospective tool for photochemistry Part 4. Temperature and envelope material dependent emission characteristics [J]. J. Photochem. Photobiol. A: Chem., 2003, **158**: 1~ 5.
- [9] Yang S G, Quan X, Li X, *et al.* Preparation, characterization and photoelectrocatalytic properties of nanocrystalline Fe₂O₃/TiO₂, ZnO/TiO₂ and Fe₂O₃/ZnO/TiO₂ composite film electrodes towards pentachlorophenol degradation [J]. Phys. Chem. Chem. Phys., 2004, **6**: 659~ 664.
- [10] 李旦振, 郑宜, 付贤智. 微波场助光催化氧化及其应用[J]. 高等学校化学学报, 2002, **23**(12): 2351~ 2356.
- [11] Horikoshi S, Hidaka H, Serpone N. Environmental remediation by an integrated microwave/UV illumination technique. 1. Microwave Assisted Degradation of Rhodamine B Dye in Aqueous TiO₂ Dispersions [J]. Environ. Sci. Technol., 2002, **36**: 1357~ 1366.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自 2006 年 5 月 1 日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

2005 年 12 月 1 日