

超声协同 H_2O_2 降解模拟废水中苯酚的影响因素试验研究

贲永光¹, 钟红茂², 孔繁晟¹, 张敬锴¹

(1. 广东药学院 药科学院, 广州 510006; 2. 中国科学院 南海海洋研究所, 广州 510301)

摘要:运用超声、 H_2O_2 以及 2 种技术相结合的超声协同 H_2O_2 方法处理苯酚模拟废水, 比较 3 种方法处理效果的差异, 并讨论了超声功率、溶液 pH 值、超声作用时间和亚铁离子 (Fe^{2+}) 的量对处理效果的影响。结果表明, 超声协同 H_2O_2 处理组对模拟废水的处理效率优于超声处理组和 H_2O_2 处理组。通过正交实验得出影响苯酚的降解率的大小次序先后为 pH 值 > 超声功率 > 超声时间 > 加入 $FeSO_4$ 量, 在实验参数的基础上, 为了获得较高的降解率和节省成本, 各因素的优化工艺参数为超声时间 60 min, 功率为 200 W, pH 值为 3, 加入 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} FeSO_4$ 量为 1.0 mL。在该最佳条件下试验, 苯酚的降解率为 81.50%。相对单独超声和单独过氧化氢而言, 采用超声协同过氧化氢法对苯酚具有降解率高、节省时间、降解速度快等优点。

关键词:超声; 过氧化氢; 降解; 苯酚; 协同效应

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0096-06

Degradation Impact Factors of Phenol Simulated Wastewater with Ultrasonic-hydrogen Peroxide

BI Yong-guang¹, ZHONG Hong-mao², KONG Fan-sheng¹, ZHANG Jing-kai¹

(1. College of Pharmacy, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, P. R. China;
2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, P. R. China)

Abstract: The use of ultrasonic, H_2O_2 and the combination of two kinds of technology approach to ultrasound H_2O_2 phenol wastewater, treatment effect of three methods were compared the differences, and discussed the ultrasonic power, the solution pH value, ultrasonic time and ferrous ions (Fe^{2+}) the amount of the treatment effect. The results show that hydrogen peroxide and ultrasonic treatment efficiency of wastewater treatment is superior to ultrasonic treatment group and H_2O_2 treatment. Through orthogonal experiments of phenol degradation rate of the size of the order has to pH > ultrasonic power > ultrasonic time > adding $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} FeSO_4$ amount of the basis of the experimental parameters, in order to obtain high degradation rate and cost, various factors. Optimization of process parameters for the ultrasonic time of 60 min, power is 200 W, pH is 3, adding $FeSO_4$ amount of 1.0 mL. Under optimum conditions in this experiment, the degradation of phenol was 81.50%. Ultrasonic is relatively separate and separate hydrogen peroxide, the use of ultrasonic hydrogen peroxide degradation rate of phenol, save time, the advantages of speed degradation.

Key words: ultrasonic; hydrogen peroxide; degradation; phenol; synergistic effect

收稿日期: 2011-06-02

基金项目: 广东省科技计划项目(2009A030100007); 企业科技特派员工作站建设项目(2010B090500033); 中国科学院海洋生物资源可持续利用重点实验室、广东省海洋药物重点实验室、广东省应用海洋生物学重点实验室联合开放基金项目(LMB081003)

作者简介: 贲永光(1976-), 男, 博士, 主要从事超声化学及废水处理研究, (E-mail) biyongguang2002@163.com.

酚类化合物是美国环境保护署(EPA)列出 129 种优先控制的污染物之一,而酚又是一种普遍使用的化工原料,也是许多工业企业生产的副产品^[1-5]。随着钢铁、炼油、石油化工、塑料、制药等工业的快速发展,含酚废水的种类与数量日益增加,污染范围广、危害性大^[6-10]。利用超声波降解难降解的有机污染物,早在 1950 年已有相关文献报道超声辐射可引起水中四氯化碳分解。20 世纪 80 年代以来,随着声化学的诞生和发展,超声降解法正受到日益广泛的重视,具有良好的应用前景。该技术操作条件温和、降解速度快、适用范围广、可以单独或与其它水处理技术联合使用,是一种很有发展潜力和应用前景的技术^[11-16]。

超声降解的机理就是基于声化学效应,但是空化机理十分复杂,因此也决定了超声降解的结果受到多种因素的影响。研究中发现,超声功率、声强、溶液温度、溶液 pH 值和溶液的初始浓度等诸多因素对超声降解废水中有机物的效率有一定的影响,为了将超声水处理技术投入到实际生产应用,需要提高处理效率,降低生产成本,故研究这些参数的影响以提高超声效率显得十分必要。

通过超声降解水体中一系列有毒有机物的研究表明,超声降解在技术上可行,但要使其走向工业化,仍存在能耗大、费用高、降解不彻底等问题。为此,最近的研究热点纷纷转向超声与其他水处理技术联用的方向上来,以产生高浓度的羟基自由基来加速有机污染物的分解反应。本文试图利用超声波协同 H₂O₂ 技术对苯酚模拟废水进行处理,探讨超声波协同 H₂O₂ 影响下诸多因素对苯酚模拟废水降解的影响,在优化条件下得到了较为满意的结果,并进一步揭示超声波协同过氧化氢处理苯酚模拟废水的机理。

1 材料和方法

1.1 材料、仪器

苯酚、溴酸钾、溴化钾、硫代硫酸钠、盐酸、碘酸钾、碘化钾、4-氨基安替比林、铁氰化钾、氯化铵、碳酸钠、过氧化氢,均为分析纯。

UV1101 紫外/可见分光光度计(上海天美科学仪器有限公司);JA2003 电子天平(上海恒平科学仪器有限公司);KH-400KDB 型高功率数控超声清洗机(昆山禾创超声仪器有限公司);

1.2 实验方法

1.2.1 苯酚模拟废水标准液的配置 称取大约

1.0 g 苯酚溶于水,移入 1 000 mL 容量瓶中,稀释至标线,用国际方法标定。将标定的苯酚标准液稀释 100 倍,得到苯酚标准中间液。

缓冲液(pH 约为 10)的配置:称取 20 g 氯化铵(NH₄Cl)溶于 100 mL 氨水中,加塞,置冰箱中保存。

1.2.2 标准曲线的绘制 分别取 0.00、1.00、3.00、5.00、7.00、9.00、11.00 mL 苯酚标准液加入到 50 mL 容量瓶中,加水至 50 mL,加入 0.5 mL 缓冲液,混匀,然后加入 1.0 mL 8% 铁氰化钾溶液,充分混匀后,放置 10 min 于 510 nm 波长,用 2.0 cm 比色皿,以蒸馏水为参比,测量吸光度,绘制标准曲线(见图 1),得到吸光度 A 与浓度 C 的关系式: $y = 12.077x + 0.0058, R^2 = 0.9999$ 。

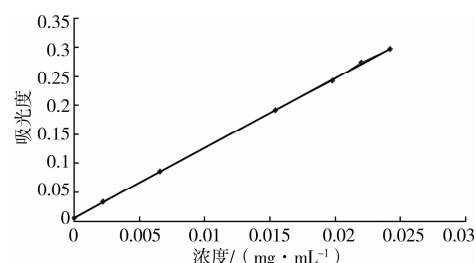


图 1 苯酚的标准曲线图

1.3 分析方法

按照水中挥发酚类的测定方法^[17]。采用 4-氨基安替比林分光光度法来测定水样中苯酚的含量,处理后苯酚的降解率按下式计算。降解率(%) = (降解前水中苯酚的含量 - 降解后水中苯酚的含量) / 降解前水中苯酚的含量 × 100。

2 结果与讨论

以苯酚样品溶液为反应液,在超声波发生槽中进行降解反应。分别改变超声功率,超声时间,样品中苯酚溶液的 pH 值,加入 H₂O₂ 的量,探讨对苯酚的降解效率的影响;然后再在根据最优条件确定的加入 H₂O₂ 的量,探讨超声波协同 H₂O₂ 对苯酚的降解效率的影响。

2.1 超声功率对苯酚降解的影响

取苯酚样品溶液 60.00 mL,置于超声波发生槽中进行降解反应。超声波处理输出功率分别为 200、240、280、320、360、400 W。每反应 10 min 取一次检测降解效果,结果发现 200 W 的降解率为 5.2%,240 W 的降解率为 4.2%,280 W 的降解率为 2.6%,320 W 的降解率为 1.9%,360 W 的降解率为 1.6%,400 W 的降解率为 1.3%(见图 2)。说

明超声波对苯酚废水的降解的能力较弱。这是因为超声波对有机物的降解的动力来源是声空化,当超声波的频率一定时,超声波强度加强,超声空化效应也增强。但是当超声功率增大到一定值时,所产生的空化气泡可以长的很大没有足够的时间崩溃,大部分的声能转变成热能,使反应体系温度升高,致使系统超声声能效率降低。而且声能太大,声发射端下部有很多大的空穴,导致声发射端同反应液体接触状况变差,空化泡会在声波的负相长得很大形成声屏蔽,反而使系统可利用的声场能量降低,降解效率下降。而且影响功率超声处理废水效果的因素有很多,除被降解溶液的 pH 值、初始浓度以及溶液的自身性质等化学因素外,超声的频率、声功率、声强以及声化学反应器的物理结构(实质是声场分布)等声学参数与降解效果之间亦有内在的联系。因此根据实验结果,选用 200 W 的超声功率。

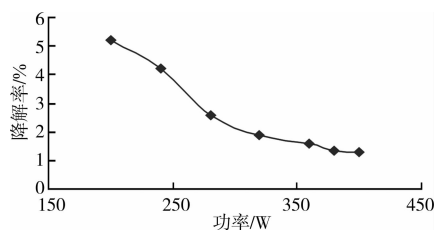


图 2 超声功率对苯酚降解率的影响

2.2 超声时间对苯酚降解的影响

取苯酚样品溶液 60.00 mL,置于超声波发生槽中进行降解反应。超声波处理输出功率按选定的最佳功率为 200 W,在超声波发生槽中降解时间分别为 30、40、50、60、70、80 min,结果发现 30 min 的降解率为 0.34%,40 min 的降解率为 1%,50 min 的降解率为 1.7%,60 min 的降解率为 2.1%,70 min 的降解率为 2.15%(见图 3)。说明在超声功率为 200 W,频率为 40 kHz 条件下,超声时间对苯酚的降解影响不大。因此,选用超声降解时间为 60 min。

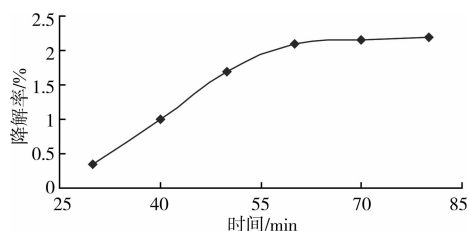


图 3 超声作用时间对苯酚降解率的影响

2.3 pH 值对苯酚降解的影响

取苯酚样品溶液 60.00 mL,置于超声波发生槽

中进行降解反应,选用超声功率为 200 W,超声时间为 60 min,改变苯酚样品溶液的 pH 值,分别为 1、3、5、7、9、11。结果(见图 4)。结果表明苯酚在酸性条件下的降解效果较好,pH=3 时的降解率最高。可见,对于苯酚的降解,溶液的 pH 值有较大影响。可解释为,当 pH 值较小时(小于有机物质的离解常数 pKa),有机物质在水溶液中以分子形式存在为主,容易接近空化泡的气液界面,并可以蒸发进入空化泡内,在空化泡内直接热解;同时又可以在空化泡的气液界面上和本体溶液中同空化产生的自由基发生氧化反应,所以降解效率高。当 pH 值较大时(大于有机物质的离解常数 pKa),有机物质发生电离以离子形式存在于溶液中,不能蒸发进入空化泡内,只能在空化泡的气液界面上和本体溶液中同自由基发生氧化反应,因此降解效率较低。从实验结果可以看出,在 pH 值较小的降解率较高,超声降解发生在空化核内或空化气泡的气-液界面处,因此溶液的 pH 值调节应尽量有利于有机物以中性分子的形态存在,并易于挥发进入气泡核内部。苯酚显弱酸性,因而在酸性环境下降解效果较好。

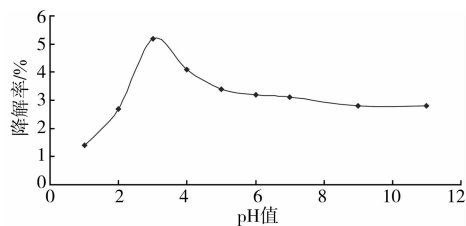


图 4 pH 值对苯酚降解率的影响

2.4 H₂O₂ 的量对苯酚降解的影响

取苯酚样品溶液 60.00 mL,置于超声波发生槽中进行降解反应,选用超声功率为 200 W,超声时间为 60 min,pH=3,改变 30% 的 H₂O₂ 的加入量,分别为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 mL,得到结果(见图 5)。结果表明加入 30% 的 H₂O₂ 有利于提高降解率,H₂O₂ 的加入量为 1.0 mL 时,超声波降解的降解率从 31% 上升到 48.1%,继续添加 H₂O₂,当加入量为 4.0 mL 时,其降解率为 81.5%,上升幅度较大。继续加入,降解率变化不大,可见,H₂O₂ 和超声发生协同效应,使降解率大大提高。因此,当加入 H₂O₂ 的量为 4.0 mL 时,苯酚的降解率最高。这可解释为,溶液中加入 H₂O₂ 后,在超声波的辐射下产生了更多的 ·OH,对苯酚发生直接氧化作用,加速苯酚的氧化反应,从而更有效降解了苯酚。而加入 H₂O₂ 的量为 4.0 mL 后继续加入,降解率变化不大,是因为声空化产生的 ·OH,导致过多的 ·OH

相互碰撞,发生湮灭,使得苯酚降解率下降。在降解反应初期羟基自由基($\cdot\text{OH}$)进攻苯环,生成了苯环的羟基化合物。随着降解反应的进行,苯环被破坏,生成了有机酸等小分子物质,其中主要表现为草酸浓度不断增加。最后,小分子羧酸进一步被氧化成二氧化碳和水。超声波降解苯酚可以分为 3 个阶段:第 1 阶段是苯环羟基化合物以及苯醌类中间物质的形成;第 2 阶段是苯环结构破坏形成链状小分子物质;第 3 阶段是深度氧化,产物以二氧化碳为主。

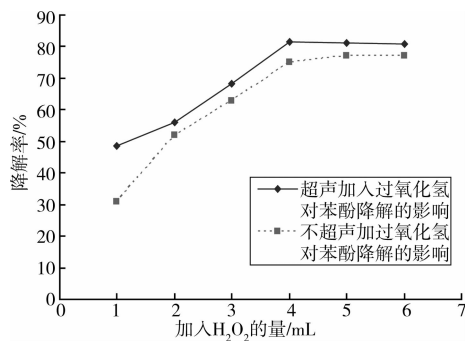


图 5 H₂O₂ 的量对苯酚降解率的影响

2.5 超声协同 H₂O₂ 中加入 Fe²⁺ 的量对苯酚降解的影响

取苯酚样品溶液 60.00 mL,置于超声波发生槽中进行降解反应。每个样品根据上面确定的 H₂O₂ 最优加入量为 4 mL,加入 H₂O₂ 4 mL,选用超声功率为 200 W,超声时间为 60 min,pH=3,改变 0.1 mmol·L⁻¹ Fe²⁺ 的加入量,分别为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 mL,进行超声降解反应,结果(见图 6)。由图 6 可以看出最高的降解率 83.8%和图 4 的最高降解率 81.5%,相比降解率提高了 2.3%,这说明加入 Fe²⁺ 和超声波再加上 H₂O₂ 三者的协同作用更加明显。这是因为一方面 H₂O₂ 既是 $\cdot\text{OH}$ 的生成剂,提供的 $\cdot\text{OH}$ 在超声波的辐射下产生了更多的 $\cdot\text{OH}$,加速苯酚的氧化反应,从而更有效降解了苯酚,同时 H₂O₂ 也是清除剂,其加入量对 $\cdot\text{OH}$ 的产量和苯酚的降解率有重要影响;另一方面在溶液中加入盐类(Fe²⁺),能改变有机物的活度性质,改变有机物在气-液界面相与本体液相之间的浓度的分配,加速苯酚的超声降解速率。降解的机理为:Fe²⁺ + H₂O₂ → Fe³⁺ + OH⁻ + $\cdot\text{OH}$; $\cdot\text{OH}$ + 苯酚 → 降解产物,同时 Fe²⁺ 的加入量对 H₂O₂ 分解 $\cdot\text{OH}$ 也有影响,Fe²⁺ 的加入量过大,会使 $\cdot\text{OH}$ 的生产速度过快,导致单位时间内 $\cdot\text{OH}$ 的产量过大,而 $\cdot\text{OH}$

在与苯酚分子作业的同时也容易被清除,这就要求在 H₂O₂ 的含量一定时,Fe²⁺ 的加入量要适中,因此 H₂O₂ 与 Fe²⁺ 有一个最佳配比的问题。

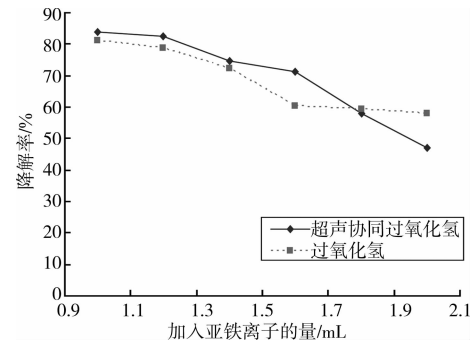


图 6 亚铁离子的量对苯酚降解率的影响

2.6 正交实验

上面讨论了各单因子的影响,但是在实际的操作中,各因素是相互交叉影响的。因此,为全面考查影响因素,设计了 4 因素 3 水平正交实验,结果见表 1—4。

表 1 试验的因素及水平

因素	超声时间 A/ min	功率 B/ W	pH C	FeSO ₄ D/ mL
1	40	200	1	1.0
2	50	240	3	1.2
3	60	280	5	1.4

表 2 正交实验的结果

编号	A	B	C	D	降解率/%
1	40	200	1	1.0	63.8
2	40	240	3	1.2	75.8
3	40	280	5	1.4	46.9
4	50	200	3	1.4	75.1
5	50	240	5	1.0	65.3
6	50	280	1	1.2	51.8
7	60	200	5	1.2	62.3
8	60	240	1	1.4	71.3
9	60	280	3	1.0	76.2

表 3 正交实验的极差分析

均值	A	B	C	D
k ₁	62.2	67.1	62.3	68.4
k ₂	64.1	70.8	75.7	63.3
k ₃	69.9	58.3	58.2	64.4
R	7.7	12.5	17.5	5.1

表4 正交实验方差分析表

因素	平方和	自由度	均方差	F值	显著性
A	96.5	2	48.2	2.23	
B	247.4	2	123.69	5.72	
C	502.6	2	251.31	11.63	*
D	43.2	2	21.6		

$$F_{0.05}(4,3)=9.12; F_{0.01}(4,3)=28.7$$

从正交实验中可以看到,影响苯酚超声降解率大小的次序:C>B>A>D,即 pH > 超声功率 > 超声时间 > 加入 FeSO₄ 量,在实验参数的基础上,为获得较高的降解率和节省溶剂用量,各因素的优化工艺参数为 A₃B₁C₂D₁,即超声时间 60 min,功率为 200 W,pH 为 3,加入 0.1 mmol · L⁻¹ FeSO₄ 量为 1.0 mL。在这个最佳条件下试验,苯酚的降解率为 81.50%。方差分析结果表明,pH(因素 C)对苯酚模拟废水的降解率的影响达到显著水平;而超声功率(因素 D)对降解率的影响最小,无显著性。

2.7 3种方法降解苯酚的比较

通过实验探讨各因素对苯酚模拟废水降解的影响,在各自最优的条件下(即超声降解在功率 200 W,降解时间 60 min,pH 值为 3 的最优条件下对苯酚的降解率为 5.2%;超声协同过氧化氢降解在功率 200 W,降解时间 60 min,pH 值为 3,H₂O₂ 的加入量为 4.0 mL 的最优条件下对苯酚的降解率为 81.5%;H₂O₂ 的降解在降解时间为 60 min 条件下对苯酚的降解率为 71.6%,由此可知,超声协同 H₂O₂ 降解苯酚比 H₂O₂ 降解的降解率提高 4.4%,比单独使用超声降解苯酚的降解率提高了 76.3%。因此,可以看到超声协同 H₂O₂ 对苯酚的降解效果比较好。

3 结语

1)酸性条件有利于苯酚的降解,而碱性条件下苯酚的降解率很低。因此,在实验中,保持溶液的 pH 值在 3~4 之间。此时,超声降解发生在空化核内或空化气泡的气-液界面处,有利于有机物以中性分子的形态存在,并易于挥发进入气泡核内部。因此,溶液 pH 值在 3~4 之间有利于苯酚的降解。

2)在 60 mL 浓度为 0.022 002 mg/mL 的苯酚溶液中,加入 1.0 mL 30% H₂O₂,超声 60 min 后,降解率从 5.2% 上升到 48.4%,可见超声波和 H₂O₂ 具有明显的协同作用。

3)加入 0.1 mmol · L⁻¹ Fe²⁺,会使降解率由

81.5% 上升到 83.8%,可见超声波和 30% H₂O₂,0.1 mmol · L⁻¹ Fe²⁺ 三者有更明显的协同作用。适量的加入一定量的 Fe²⁺ 有利于 H₂O₂ 分解 · OH,从而加速苯酚的氧化反应,进而更有效降解了苯酚,提高苯酚的降解率。

4)通过正交实验结果得出,影响超声协同 H₂O₂ 降解苯酚的降解率影响大小的次序为:pH > 超声功率 > 超声时间 > 加入 FeSO₄ 量,各因素的优化工艺参数为超声时间 60 min,功率为 200 W,pH 为 3,加入 0.1 mmol · L⁻¹ FeSO₄ 量为 1.0 mL,在这个最佳条件下试验,苯酚的降解率为 81.50%。

参考文献:

- [1] 何志桥,宋爽,周华敏,等. 臭氧/超声联合降解水中对氨基苯酚的动力学[J]. 化工学报, 2006,57(12):2964-2969.
HE ZHI-QIAO, SONG SHUANG, ZHOU HUA-MIN, et al. Kinetics of degradation of 4-aminoPhenol in aqueous solution by ozonation combined with sonolysis [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006,57(12):2964-2969.
- [2] 王公正,吴胜举. 超声波对苯酚有机废水降解研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,2003,31(2):46-47.
WANG GONG-ZHENG, WU SHENG-JU. Degradation of phenol waster-water by ultrasonic wave[J]. Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition, 2003,31(2):46-47.
- [3] WANG C T, HU J L, CHOU W L, et al. Removal of color from real dyeing wastewater by Electro-Fenton technology using a three-dimensional graPHite eathode [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,152(2):601-606.
- [4] HUANG YUN, MA XIAOYAN, LIANG GUOZHENG. Adsorption of Phenol with modified rectorite from aqueous solution[J]. Chemical Engineering Journal, 2008,141:1-8.
- [5] 朱昌平,黄波,倪才华,等. 功率超声的声学参数对废水处理效果的影响[J]. 水资源保护, 2008,24(3):58-59.
ZHU CHANG-PING, HUANG BO, NI CAI-HUA, et al. Effects of acoustic parameters of power ultrasound on wastewater treatment efficiency[J]. Water Resources Protection, 2008,24(3):58-59.
- [6] 魏瑞霞,陈菊香. 超声技术处理难降解有机物的影响因素[J]. 环境科技, 2009,22(1):64-65.
WEI RUI-XIA, CHEN JU-XIANG. Advance of application and research of ultrasonic technique in coke plant wastewater treatment[J]. Environmental Science and Technology, 2009,22(1):64-65.

- [7] Neppolian B, HAERYONG JUNG, HEECHUL CHOI, et al. Sonolytic degradation of methyl tert-butyl ether: the role of coupled fenton process and persulPHate ion[J]. Water Research, 2002, 36: 4699 - 4708.
- [8] ZHANG HUI, DUAN LI-JIE, ZHANG DAO-BIN. Decolorization of methyl orange by o-zonation in combination with ultrasonic irradiation[J]. Journal of Hazardous Materials B, 2006, 138(1): 53-59.
- [9] 郑怀礼, 张占梅. 双频超声辐射协同 H₂O₂ 降解偶氮染料废水的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 11(4): 2401-2402.
- ZHENG HUA-LI, ZHANG ZHAN-MEI. Degradation of azo dye wastewater by dual-frequency ultrasound synergized with H₂O₂ [J]. Chinese Journal of environmental Engineering, 2010, 11(4): 2401-2402.
- [10] 成泽伟, 苍大强. 超声协同光催化处理焦化废水研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(3): 73-75.
- CHENG ZE-WEI, CANG DA-QIANG. Research on photocatalytic treatment of coking wastewater synergized with ultrasonic [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(3): 73-75.
- [11] 陈林. 超声技术在处理有毒有机废水中的应用[J]. 辽宁化工, 2010, 39(11): 1136-1137.
- CHEN LIN. Ultrasound technology in the treatment of toxic organic wastewater [J]. Liaoning Chemical Industry, 2010, 39(11): 1136-1137.
- [12] SONG SHUANG, XIA MIN, HE ZHI-QIAO, et al. Degradation of p-nitretoluene in aqueous solution by ozonation combined with sonolysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(12): 532-537.
- [13] SVITELSKA G V, GALLIOS G P, ZONHOULIS A I. Sonochemical decomposition of natural polyPhenolic compound (condensed tannin) [J]. ChemosPHere, 2004, 56 (10): 981-987.
- [14] LIANG JUN, KOMAROV SERGEY, HAYASHI NAOHITO, et al. Improvement in sonochemical degradation of 4-ehloroPhenol by combined use of Fenton-like reagents [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(2): 201-207.
- [15] 谭江月. 双频超声/臭氧联用处理硝基苯类制药废水研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 590-592.
- TAN JIANG-YUE. Studies on treatment of pharmaceutical waste water containing nitrobenzene by dual-frequency ultrasonic/ozone [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(3): 590-592.
- [16] 邱潇潇, 丁暘, 尹立红, 等. 超声-臭氧法处理 PTA 模拟废水的影响因素[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 359-361.
- QIU XIAO-XIAO, DING YANG, YIN LI-HONG. Influential factors of PTA simulated wastewater ultrasound-ozone treatment [J]. Journal of Southeast University; Natural Science Edition, 2009, 39(2): 359-361.
- [17] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 50-55.

(编辑 胡英奎)