

文章编号:1000-582X(2010)09-079-07

## 空化水射流结合 Fenton 处理硝基苯废水的实验

卢义玉, 蒋林艳, 夏彬伟, 左伟芹, 张 赛, 赵艳萍

(重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

**摘 要:**硝基苯类化合物具有弱致突变性,且化学性能稳定,常规的废水处理方法很难使其净化。采用空化水射流结合 Fenton 处理硝基苯废水,研究了多种因素对硝基苯去除率的影响,通过对比分析得出,当硝基苯初始质量浓度为 50 mg/L,处理条件为  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度 40 mg/L,  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度 150 mg/L, 围压 0.5 MPa, pH 值 5.0, 泵压 10 MPa 时,硝基苯去除率达到 95.06%;同时,通过高效液相色谱揭示了其降解机理:空化水射流促使 Fenton 释放出更多的  $\text{HO}\cdot$  并加剧  $\text{Fe}^{2+}$  的催化能力,将硝基苯直接降解或氧化,分解成链烃、有机酸等小分子有机物,并分析得出硝基苯降解中间产物为苯醌,4-硝基酚,2-硝基酚,对苯二酚等。

**关键词:**硝基苯降解;空化水射流;羟基自由基;Fenton 试剂

**中图分类号:**X703

**文献标志码:**A

### Experimental study on nitrobenzene by cavitating water jets assisted with Fenton

LU Yi-yu, JIANG Lin-yan, XIA Bin-wei, ZUO Wei-qin, ZHANG Sai, ZHAO Yan-ping

(College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Nitrobenzene compounds, featured with weak mutagenicity, chemical stability, are difficult to be purified by traditional degradation method. Several factors involved in the nitrobenzene wastewater degradation are comparatively analyzed by cavitating water jets assisted with Fenton. The removal ratio of nitrobenzene, whose concentration is 50 mg/L, reaches 95.06% when the  $\text{Fe}^{2+}$  concentration is 40 mg/L, the pH value, 5.0, the hydrogen peroxide concentration, 150 mg/L, the confining pressure, 0.5 MPa, and the jetting pressure, 10 MPa. The degradation mechanism, shown by high performance liquid chromatography (HPLC), is that the cavitating water jet impelled the Fenton to release more  $\text{HO}\cdot$  and enhances the catalytic capacity of  $\text{Fe}^{2+}$ , then the nitrobenzene is degraded or oxidized totally, or graded into small organic molecules such as chain hydrocarbon and organic acids, etc. Besides, the intermediate products, including Benzoquinone, 4-Nitrophenol, 2-Nitrophenol and Hydroquinone, are also shown by HPLC.

**Key words:** nitrobenzene degradation; cavitating water jet; hydroxyl radical; Fenton reagent

硝基苯是硝基芳香族化合物的一种,属于高毒性物质,被列在世界“环境优先控制有毒有机污染

物”的名单前列<sup>[1]</sup>,其废水如不经过深度处理排放,会给人体、水体、鱼体以及农作物带来严重的危害。

收稿日期:2010-04-22

基金项目:国家自然科学基金委专项创新研究群体基金项目(50621403);重庆市杰出青年基金(CSCT,2009BA6047);新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-07677)

作者简介:卢义玉(1972-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事高压水射流理论及其应用等方面的研究,  
(Tel)02365106640;(Email)Luyiyu@cqu.edu.cn.

硝基苯废水的处理方法可分为物理法、化学法以及生物法等<sup>[2-11]</sup>。但这些方法普遍存在处理效率低,去除效果不佳或造成二次污染等缺点。空化水射流是人为地在射流流束内产生许多空泡,利用空泡破裂所产生的强大空化效应来增强射流的作用效果。空化效应产生局部高温(5 000 K)和高压( $1.013 \times 10^8$  Pa),促使水分子产生 HO· 和 H· 自由基,这些含有未配对电子的自由基,直接氧化水溶液中的芳香族有机化合物,使之降解。同时一些非极性、易挥发有机废物的蒸汽也会直接分解<sup>[12-18]</sup>。

采用空化水射流与 Fenton 联合的工艺处理硝基苯废水,考察了各种影响因素对硝基苯去除率的影响情况,并利用高效液相色谱技术分析了空化水射流 Fenton 氧化降解反应的中间产物,揭示了空化水射流结合 Fenton 降解硝基苯的反应机理。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。水箱中的硝基苯废水经往复柱塞泵通过空化器进口端的空化喷嘴进入空化器,在空化器中被空化处理,然后从空化器出口回到水箱,如此循环空化处理。

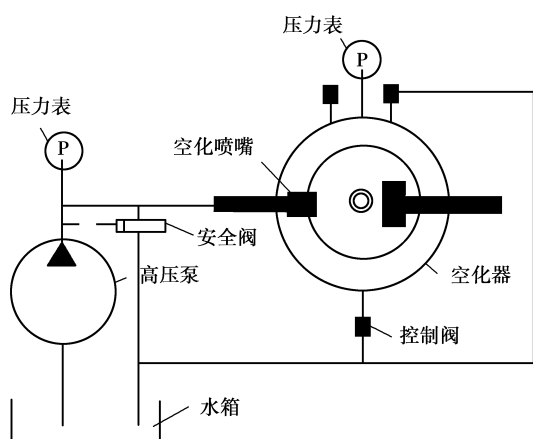


图 1 空化实验流程图

### 1.2 实验方法

用蒸馏水配置 50 mg/L 的硝基苯溶液 45 L 放入水箱之中,用 NaOH 和  $H_2SO_4$  溶液调节其 pH 值,温度为室温。在实验过程中分别改变  $Fe^{2+}$  质量浓度、 $H_2O_2$  质量浓度、pH 值、泵压、围压的值。这里的围压是指空化器内的压力,即产生空化的环境压力。实验取样间隔时间为 5 min,反应持续 60 min,对样品进行分析测试。

### 1.3 实验试剂与检测方法

所用试剂主要有:硝基苯、双氧水(30%)、硫酸亚铁、锌粉、N-(1-萘基)乙二胺叔丁醇、氢氧化钠、苯醌等。所有的溶液均用蒸馏水配置。硝基苯含量用还原-偶氮比色法测定;通过向反应液中投加一定量的不同浓度的叔丁醇可以反映出羟基自由基对硝基苯去除效果的影响程度。反应过程中产生的中间产物,采用高效液相色谱分析。色谱柱:  $C_{18}$  (250 mm  $\times$  4.6 mm, 5  $\mu$ m);柱温为 30  $^{\circ}C$ ,流动相为甲醇水溶液流速为 1.00 mL/min,测定波长为 280 nm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交实验结果与分析

空化水射流结合 Fenton 处理硝基苯废水主要受泵压、围压、pH 值、 $Fe^{2+}$  质量浓度、 $H_2O_2$  质量浓度的影响,为了初步确定各因素的取值,及其影响处理效果的主次关系,设计如下 5 因素 4 水平的正交实验,各因素的内容及取值见表 1。

取  $L_{16}(4^5)$  正交表,依据表 1 中因素和水平的取值,进行正交实验,正交实验以硝基苯去除率为指标,结果如表 2。

根据正交实验结果和极差分析,可知在选择的影响空化结果各因素中,其影响程度的大小依次为:  $\rho_{Fe^{2+}} > pH > \rho_{H_2O_2} > 围压 > 泵压$ ,因此按此顺序分别确定影响空化结果各单个因素对硝基苯去除率的影响趋势。同时,初步确定各因子最佳取值为:泵压 20 MPa,围压 0.5 MPa,pH 值 3.0, $Fe^{2+}$  质量浓度 40 mg/L, $H_2O_2$  质量浓度 200 mg/L。

表 1 因素水平综合表

水平	因素				
	泵压/MPa	围压/MPa	pH 值	$\rho_{H_2O_2} / (mg \cdot L^{-1})$	$\rho_{Fe^{2+}} / (mg \cdot L^{-1})$
1	5	0.5	3	50	10
2	10	1.0	5	100	20
3	15	1.5	7	150	30
4	20	2.0	9	200	40

表2 空化正交实验结果

序号	因素					硝基苯降解率/%
	泵压/MPa	围压/MPa	pH 值	$\rho_{\text{H}_2\text{O}_2}$ /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho_{\text{Fe}^{2+}}$ /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	
1	5	0.5	3	10	50	64.43
2	5	1.0	5	20	100	74.69
3	5	1.5	7	30	150	74.35
4	5	2.0	9	40	200	74.31
5	10	0.5	5	30	200	93.26
6	10	1.0	3	40	150	98.23
7	10	1.5	9	10	100	46.32
8	10	2.0	7	20	50	62.11
9	15	0.5	7	40	100	84.14
10	15	1.0	9	30	50	64.32
11	15	1.5	3	20	200	89.74
12	15	2.0	5	10	150	62.58
13	20	0.5	9	20	150	82.24
14	20	1.0	7	10	200	73.64
15	20	1.5	5	40	50	84.34
16	20	2.0	3	30	100	84.06
$K_1$	287.78	324.07	336.46	246.97	275.20	—
$K_2$	299.92	310.88	314.87	308.78	289.21	—
$K_3$	300.78	294.75	294.24	315.99	317.40	—
$K_4$	324.28	283.06	267.19	341.02	330.95	—
$R$	36.50	41.01	69.27	94.05	55.75	—

## 2.2 单因素影响实验结果与分析

### 2.2.1 $\text{Fe}^{2+}$ 质量浓度对硝基苯处理效果的影响

配置溶液  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度分别为 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 mg/L。使用  $\text{H}_2\text{SO}_4$  调节硝基苯废水的 pH 值分别为 3.0, 进行单因素实验, 其他条件为围压 0.5 MPa, 泵压 20 MPa,  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度 200 mg/L, 空化时间 60 min, 测定硝基苯质量浓度, 实验结果见图 2。

由图 2 可以看出,  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度低于 40 mg/L 时, 随着  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度增大硝基苯去除率也随着增

大;  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度为 40 mg/L 时, 硝基苯去除率达到最大, 为 99.29%;  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度高于 40 mg/L 时, 随着  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度继续增大, 硝基苯去除率开始变小;  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度为 70 mg/L 时, 硝基苯去除率只有 88.34%。当  $\text{Fe}^{2+}$  的质量浓度过低时, 自由基的产生量和产生速率都很小, 降解过程受到抑制; 当  $\text{Fe}^{2+}$  过量时, 它还原  $\text{H}_2\text{O}_2$  且自身被氧化为  $\text{Fe}^{3+}$ 。因此, 当  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度过高时, 随着  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度增加, 硝基苯去除率不再增加反而有减小的趋势。

考虑处理成本和处理效率, 选取  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度

为 40 mg/L 作为最优条件。

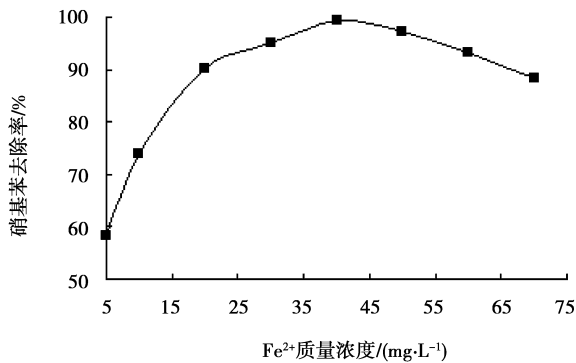


图 2 Fe<sup>2+</sup> 质量浓度对硝基苯去除率的影响

### 2.2.2 pH 值对硝基苯处理效果的影响

调节硝基苯废水的 pH 值分别为 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 进行单因素实验, 其他条件为 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度为 200 mg/L, Fe<sup>2+</sup> 质量浓度 40 mg/L, 围压 0.5 MPa, 泵压 20 MPa, 空化时间 60 min, 测定硝基苯质量浓度, 实验结果见图 3。

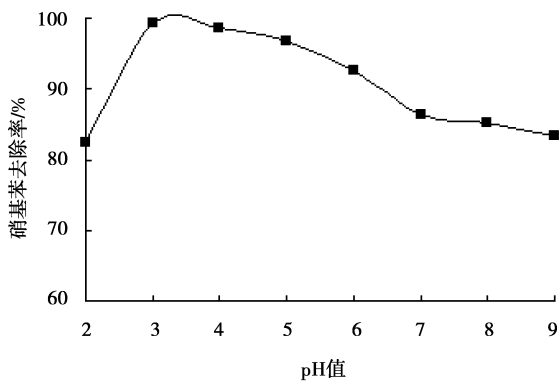


图 3 pH 值对硝基苯去除率的影响

由图 3 可知, pH 值小于 3 时, 溶液中硝基苯的降解率随着 pH 值的增加而迅速增加, 溶液在 pH 值为 3 的时候, 硝基苯的降解率达到最大值, 为 99.29%, 当溶液 pH 值大于 3 的时候, 硝基苯的降解率随着 pH 值的增加而缓慢降低。

按照经典的 Fenton 反应理论, Fenton 试剂是在酸性条件下发生作用的, 因为溶液的 pH 值决定着 Fe<sup>2+</sup> 在溶液中的存在形态, 当 pH 值过高时会抑制羟自由基的产生, 另外, pH 值的变化也会直接影响到 Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 的络合平衡体系, 从而影响 Fenton 试剂的氧化能力。当 pH 低于 3 时, 溶液中的 H<sup>+</sup> 浓度过高, Fe<sup>3+</sup> 不能顺利地被还原为 Fe<sup>2+</sup>, 催化反应受阻, pH 升高不仅抑制了 HO· 的产生, 而且使溶

液中的 Fe<sup>2+</sup> 以氢氧化物的形式沉淀而失去氧化能力。

当 pH 为 3 时, 硝基苯的去除率为 99.29%, 当 pH 为 5 时, 硝基苯的去除率为 96.84%。实际工程中, pH 值过低会加大后续的酸碱度调节工艺的投药量, 还可能会对设备造成腐蚀或造成二次污染, 所以处理环节中不宜使 pH 值过低, 选取 pH 值为 5 作为最优条件。

### 2.2.3 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度对硝基苯处理效果的影响

调节 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度分别为 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 mg/L。使用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 调节硝基苯废水的 pH 值分别为 3.0, 进行单因素实验, 其他条件为围压 0.5 MPa, 泵压 10 MPa, Fe<sup>2+</sup> 质量浓度 40 mg/L, 空化时间 60 min, 测定硝基苯浓度, 实验结果见图 4。

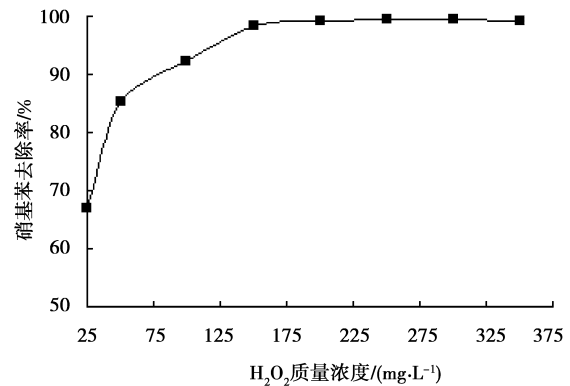


图 4 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度对硝基苯处理效果的影响

从图 4 可以看出, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度小于 150 mg/L 时, 硝基苯的去除率随 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度增大而增大, 而当 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度大于 150 mg/L 时, 硝基苯的去除率随 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度增大继续缓慢增大, 但变化很小。一般来讲, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体质量的增加导致更多的 HO· 产生和更为有效的降解作用, 但是, 当加入的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的体积质量增加到一定程度时, 硝基苯的降解效率随 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的体积质量的变化已不大明显。这是因为过量的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 会与 HO· 产生 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub>, 此外溶液中过量的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 也会与 HO· 反应产生过氧自由基(HO<sub>2</sub>·), HO<sub>2</sub>· 的氧化性能则相对较弱。而且过量的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 会在反应一开始就把 Fe<sup>2+</sup> 氧化成 Fe<sup>3+</sup>, 因此过高的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 加入量并未使硝基苯的去除率相应量的增加。

由于当 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度超过 150 mg/L 后, 硝基苯的去除率变化较小, 考虑到经济成本, 选择 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量浓度为 150 mg/L 作为最佳条件。

#### 2.2.4 泵压对硝基苯处理效果的影响

配置溶液中  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度为 200 mg/L,  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度 40 mg/L。使用  $\text{H}_2\text{SO}_4$  调节硝基苯废水的 pH 值为 3.0, 进行单因素实验, 调节围压 0.5 MPa, 泵压分别为 2, 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20 MPa, 空化时间 60 min 测定硝基苯质量浓度, 实验结果见图 5。

由图 5 可以看出, 当泵压小于 10 MPa 时, 随着泵压的增加, 硝基苯的去除率也增加。这是因为, 当泵压较小时, 反应器中的溶液循环较慢, 能在空化器内接触空泡, 并在高温高压的条件下进行转化的硝基苯废水较少。而泵压增大以后, 溶液循环加快, 经空化处理的硝基苯溶液质量增加, 因而去除率也增大。但是当泵压大于 10 MPa 以后, 硝基苯的去除率的变化就较小了, 此时, 溶液的循环速度对空化的效果不起主要的作用。其它条件不变, 10 MPa 和 20 MPa 的泵压条件下, 硝基苯的最大去除率分别为 32.65% 和 33.56%。考虑到泵压过高能耗增加, 而且 10 MPa 条件下的硝基苯去除效果已经很接近 20 MPa 的结果, 所以泵压条件选择为 10 MPa。

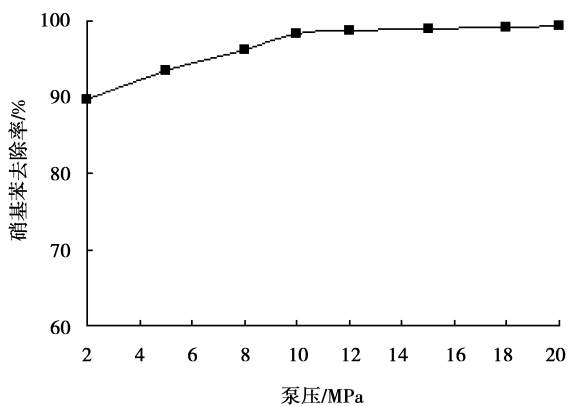


图 5 泵压对硝基苯去除率的影响

#### 2.2.5 围压对硝基苯处理效果的影响

配置初始浓度为 50 mg/L 的硝基苯溶液 45 L, 使用  $\text{H}_2\text{SO}_4$  调节硝基苯废水的 pH 值分别为 3.0, 进行单因素实验, 调节围压分别为 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0 MPa, 泵压 20 MPa, 空化时间 60 min, 测定硝基苯质量浓度, 实验结果见图 6。

从图 6 可以看出, 围压值在 0.2~1.0 MPa 这段区间时, 硝基苯去除率较高, 特别地, 当围压为 0.5 MPa 时, 硝基苯去除率达到最大值, 为 99.29%。而当围压大于 1 MPa 以后, 随着围压的增大硝基苯的降解率降低。因此选择最佳围压为 0.5 MPa。表明低围压条件有利于硝基苯的降解率提高, 空化作用明显, 在高围压条件下空化作用差。这是因为, 当

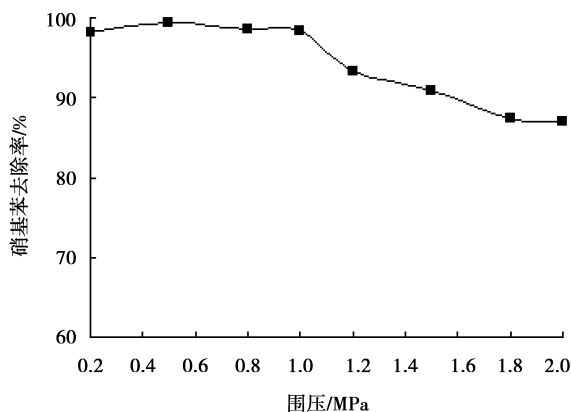


图 6 围压对硝基苯去除率的影响

围压降低时, 空化器内的局部蒸汽压降低的较快, 导致空化现象加剧, 于是对硝基苯废水的降解也有所加快。

### 3 空化水射流/Fenton 系统协同效应

根据以上实验结果分析, 优化空化条件为  $\text{Fe}^{2+}$  质量浓度 40 mg/L,  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度 150 mg/L, 围压 0.5 MPa, pH 值 5.0, 泵压 10 MPa。图 7 显示了初始质量浓度为 50 mg/L, 体积为 45 L 的硝基苯溶液在最佳空化条件下, 分别用空化、Fenton、空化/Fenton 3 种工艺处理的降解情况。在空化水射流工艺中, 硝基苯的去除率随时间略有增加, 但是去除效果不够理想, 为 28.54%。在 Fenton 工艺中, 硝基苯去除率为 59.34%。在空化射流/Fenton 系统中, 硝基苯降解速率明显提高, 60 min 后降解率在 95% 以上。比较发现, 同一时间内硝基苯的去除率大于在单一空化、Fenton 工艺中各去除率之和。因此, 在空化/Fenton 系统中必然发生了空化射流和 Fenton 相互作用, 协同降解的作用, 且作用效果较为明显。

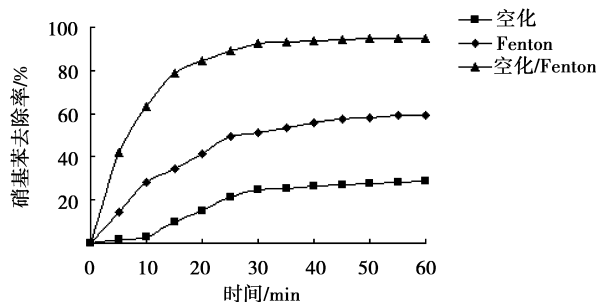


图 7 硝基苯分别在空化、Fenton、空化/Fenton 3 种工艺下的降解情况

从图 7 可以看出,随着时间的增长,空化、Fenton、空化/Fenton 3 种工艺处理的降解变化不明显,硝基苯的去除率都趋于稳定,考虑到效率与能耗,时间选取不需过长。

#### 4 硝基苯降解过程中间产物的分布及机理研究

为了研究空化水射流结合 Fenton 处理硝基苯废水前后的有机物成分变化,根据硝基苯分子结构的特点,结合相关文献,从理论上分析硝基苯降解可能存在的中间产物,并进行了相关中间产物标准物质的 HPLC 实验。反应产物中 4-硝基酚和 2-硝基酚的存在,证明了羟基自由基的存在,苯醌和对苯二酚的存在证明了硝基苯的脱硝途径。

图 8 与标准式样对比验证,可知峰 A,B,C,D 依次为苯醌,4-硝基酚,2-硝基酚,对苯二酚。通过色谱图出峰的保留时间与已知标准物质的保留时间比较,可分析反应的中间产物,通过出现的中间产物,可推断空化强化  $H_2O_2$  氧化降解硝基苯的反应机理。

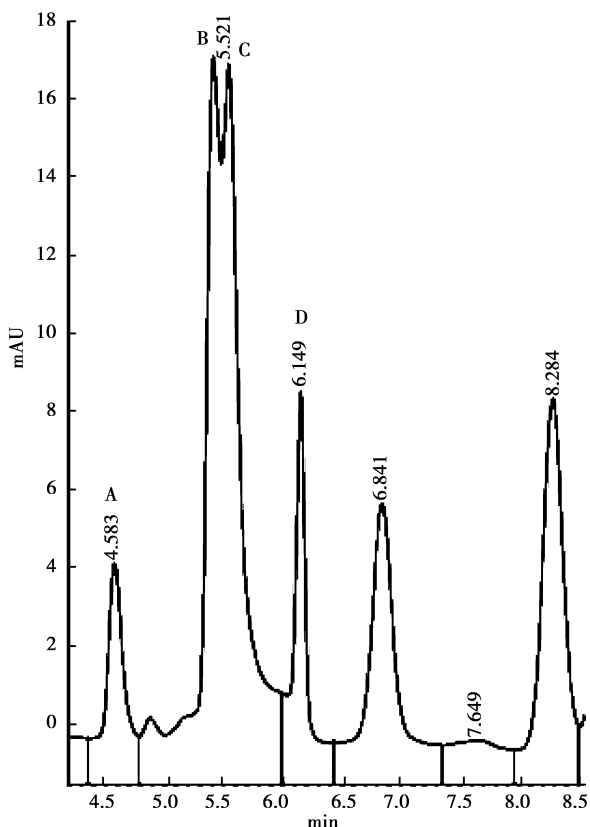
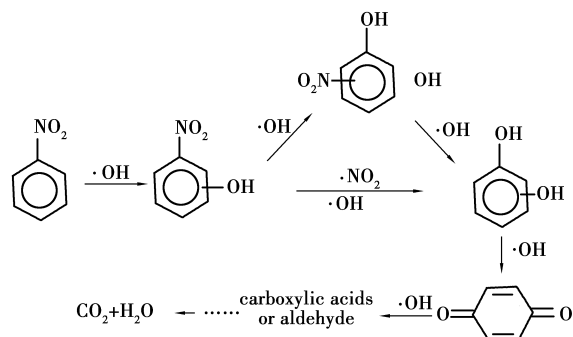


图 8 不同反应时间的色谱图

通过对 HPLC 分析探讨,具体推断出空化氧化

降解硝基苯的机理:第一阶段硝基苯转化为硝基苯酚。若反应中存在溶解氧,产生硝基苯酚和  $HO_2 \cdot$  自由基。不存在溶解氧时,生成硝基苯酚的同分异构体。第二阶段硝基苯酚进一步转化。主要的中间产物同羟基自由基发生更深层次反应,导致苯环分裂,形成小分子酸或醛类,最终彻底降解为  $CO_2$  和  $H_2O$ 。由此可以看出,羟基自由基是反应的活性中心。整个硝基苯氧化反应途径可表示为:



#### 5 结 语

通过以上实验和结果分析,得到以下 3 点结论:

1) 空化水射流结合 Fenton 可以有效的处理硝基苯废水,该种处理方法可使硝基苯转化为其它较易被氧化的有机物,如苯醌等,使硝基苯更易于被彻底处理。且空化和 Fenton 的联合工艺存在协同效应,使空化射流结合 Fenton 氧化降解硝基苯效率高于单独空化和 Fenton 降解效率之和。

2) 空化水射流结合 Fenton 处理方法主要受 pH 值、 $H_2O_2$  质量浓度、 $Fe^{2+}$  质量浓度、围压、泵压 5 种因素的影响,优化空化处理条件为: $Fe^{2+}$  质量浓度 40 mg/L,  $H_2O_2$  质量浓度 150 mg/L, 围压 0.5 MPa, pH 值 5.0, 泵压 10 MPa。此时,硝基苯去除率为 95.06%。

3) 采用 HPLC 技术对硝基苯废水水样进行色谱分析。得出空化水射流结合 Fenton 氧化降解硝基苯的过程是:反应初期生成 4-硝基酚、2-硝基酚和苯醌,证明了羟基自由基的存在,苯醌和对苯二酚的存在证明了硝基苯的脱硝途径;第二阶段产物是 1,4-苯半醌、对苯二酚、1,4-苯醌、对苯二酚,它是苯环进一步氧化开环的结果。

#### 参考文献:

- [1] 王连生. 有机污染化学[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [2] 崔榕,向夕品,殷钟意,等. 固定相络合萃取技术回收处理水中硝基苯[J]. 工业水处理,2005,25(10):59-61.  
CUI RONG, XIANG XI-PIN, YIN ZHONG-YI, et al. Fixed phase complexing extractant to the treatment of

- wastewater containing nitrobenzene [J]. *Industrial Water Treatment*, 2005, 25(10): 59-61.
- [3] 谢云成. 超声波技术在废水处理中的应用研究[J]. *重庆文理学院学报: 自然科学版*, 2006, 5(3): 28-30.  
XIE YUN-CHENG. Ultrasonic wave technology in waste water processing applied research[J]. *Journal of Chongqing University of Arts and Sciences: Natural Science Edition*, 2006, 5(3): 28-30.
- [4] 魏群, 高孟理, 孙三祥, 等. 水力空化降解若丹明 B 的初步试验研究[J]. *湖南城市学院学报*, 2004, 13(3): 25-27.  
WEI QUN, GAO MENG-LI, SUN SAN-XIANG, et al. Experimental study of the decomposition of rhodamine B by hydrodynamic cavitation[J]. *Journal of Hunan City University*, 2004, 13(3): 25-27.
- [5] 卢义玉, 左伟芹, 李晓红, 等. 空化水射流双氧水处理苯酚废水的机理分析[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(10): 1165-1173.  
LU YI-YU, ZUO WEI-QIN, LI XIAO-HONG, et al. Treating phenol wastewater by hydrogen peroxide assisted with a cavitating water jet [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(10): 1165-1173.
- [6] PAYRI F, BERMUDEZ V, PAYRI R, et al. The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles [J]. *Fuel*, 2004, 83(4-5): 419-431.
- [7] HITOSHISA. High-speed observation of a cavitating jet in air [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2005, 127(4): 1095-1101.
- [8] QIN M, JU D Y, OBA R. Improvement on the process capability of water cavitation peening by aeration [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200(18-19): 5364-5369.
- [9] CHUN L Z, JI T Z, JING W, et al. Aerobic degradation of nitrobenzene by immobilization of *Rhodotorula mucilaginosa* in polyurethane foam [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(1): 298-303.
- [10] CHUN L Z, BAO C Q, JING W, et al. Isolation and characterization of a novel nitrobenzene-degrading bacterium with high salinity tolerance; micrococcus luteus [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1-3): 1152-1158.
- [11] JIAN F W, CHENG Y J, BAO J W, et al. Novel partial reductive pathway for 4-chloronitrobenzene and nitrobenzene degradation in *comamonas* sp. strain CNB-1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(3): 1759-1765.
- [12] 卢义玉, 冯欣艳, 李晓红, 等. 高压空化水射流破碎岩石的试验分析[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2006, 29(5): 88-91.  
LU YI-YU, FENG XIN-YAN, LI XIAO-HONG, et al. Experiments on breaking rock with high-pressure cavitating water jets [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2006, 34(5): 9-11.
- [13] 卢义玉, 李倩, 李晓红, 等. 空化水射流空泡云长度的试验研究[J]. *流体机械*, 2006, 34(5): 9-11.  
LU LI-YU, LI QIAN, LI XIAO-HONG, et al. Experimental study on bubble cloud length of cavitating water jet [J]. *Fluid Machinery*, 2006, 34(5): 9-11.
- [14] GOGATE P R. Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes [J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, 6(3): 335-358.
- [15] KALUMUCK K M, CHAHINE G L. The use of cavitation jets to oxidize organic compounds in water [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2000, 122(11): 465-470.
- [16] 葛强, 李晓红, 卢义玉, 等. 空化射流处理有机废水的机理[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2007, 30(5): 19-22.  
GE QIANG, LI XIAO-HONG, LU YI-YU, et al. Mechanism of organic wastewater treatment by cavitating jets [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2007, 30(5): 19-22.
- [17] SUN Z, KANG X Q, WANG X H. Experimental system of cavitation erosion with water-jet [J]. *Materials and Design*, 2005, 26(1): 59-63.
- [18] HUA I, HOECHEMER R H, HOFFMANN M R. Sonolytic hydrolysis of P-nitrophenyl acetate. The role of supercritical water [J]. *J Phys Chem*, 1995, 99(8): 2335-2342.

(编辑 赵静)