

活性炭-Fenton 组合法去除水中 PAEs 的研究

孙大贵, 陶长元, 刘作华, 杜军, 刘仁龙

(重庆大学化学化工学院, 重庆 400030)

摘要: 采用活性炭-Fenton 组合法催化氧化去除水中的邻苯二甲酸酯(PAEs), 研究了 H_2O_2 、 Fe^{2+} 、 H_2O_2/Fe^{2+} 及活性炭的用量、pH 值、反应时间以及 PAEs 的初始浓度等对水中 PAEs 去除率的影响. 结果表明, 在 Fenton 试剂与活性炭的协同作用下, 对 PAEs 具有较好的去除效果. PAEs 水溶液(DMP、DEP、DBP、DOP 各为 $12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 经活性炭-Fenton 法处理 15 h 后, PAEs 的平均去除率可达到 99.1%.

关键词: 活性炭; Fenton 试剂; 邻苯二甲酸酯

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)12-2734-06

Removal of PAEs by Combined Activated Carbon-Fenton Process

SUN Da-gui, TAO Chang-yuan, LIU Zuo-hua, DU Jun, LIU Ren-long

(College of Chemistry & Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Removal of PAEs by combined process of activated carbon-Fenton was investigated. Factors associated with PAEs removal ratio following amount of activated carbon, dosages of oxidant, catalyst, initial concentration of PAEs, pH value and reaction time were studied. Results showed that high purification performance could be obtained by the synergetic effect of Fenton reagent and activated carbon. Average removal ratio of PAEs was 99.1% for the solution containing $12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ DMP, DEP, DBP, DOP respectively by the activated carbon-Fenton process for 15 h.

Key words: activated carbon; Fenton reagent; phthalic acid esters (PAEs)

邻苯二甲酸酯(PAEs, 酞酸酯)是环境中普遍存在的环境内分泌干扰物, 特别是城市生活垃圾和渗滤液中含有浓度显著的 PAEs^[1~3]. 它抗光解、抗氧化、难降解, 目前生物降解是处理邻苯二甲酸酯类化合物的主要途径之一^[4~6], 但由于各种原因处理效果有限, 仍有待于筛选高效专性或兼性的降解菌. 也有采用光催化、臭氧氧化、活性炭及其组合工艺等去除水中邻苯二甲酸酯的研究, 而对工业生产中产生的浓度较高的邻苯二甲酸酯废水通常采用焚烧法处理^[7~14].

Fenton 试剂能产生氧化能力很强的 $\cdot\text{OH}$, 在处理难生物降解或一般化学氧化难以氧化的有机废水时, 具有温度和压力等反应条件温和且无二次污染等优点, 因此, 在废水处理中的应用受到重视. 但如果单独使用 Fenton 试剂, H_2O_2 的利用率不够高, 增加了处理成本. 因此, 各种改进及组合法应运而生^[15]. 陶长元等^[16, 17]利用超声波-Fenton 法脱色甲基橙溶液, 微波-Fenton 组合法处理渗滤液, 提高了 Fenton 试剂的利用率. 活性炭具有较强的吸附性和催化性能、耐酸碱、耐热、不溶于水和有机溶剂、来源广泛等优点, 但活性炭对分子量较大的有机物吸附性较差. 本研究采用活性炭-Fenton 试剂组合去除水中的邻苯二甲酸酯, 利用 Fenton 试剂与活性炭的协

同作用提高处理效率.

1 材料与方 法

1.1 实验仪器及材料

Agilent 1100 高效液相色谱仪, 色谱柱 Hypersil ODS 4.6 mm \times 150 mm, 固定相颗粒度 $5\ \mu\text{m}$, 多波长紫外-可见光检测器, 进样器定量管体积为 $20\ \mu\text{L}$. 硫酸亚铁, 30% 过氧化氢, 硫酸, 邻苯二甲酸二甲酯(DMP), 邻苯二甲酸二乙酯(DEP), 邻苯二甲酸二丁酯(DBP), 邻苯二甲酸二辛酯(DOP), 活性炭, 均为分析纯由重庆无机化学试剂厂提供; 甲醇、乙腈为色谱纯, 由天津市四友公司提供; 水为超纯水.

1.2 实验方法

配制含 DMP、DEP、DBP、DOP 浓度各为 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的邻苯二甲酸酯溶液, 作为实验水样; 称取一定质量的 $FeSO_4\cdot 7H_2O$ 配制浓度为 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸亚铁溶液; 取一定体积的水样, 分别加入一定量的 H_2O_2 , 硫酸亚铁溶液, 再加入活性炭, 定容至 50 mL 并调节 pH 为 3. 处理一定时间后用高效液相色谱

收稿日期: 2007-01-21; 修订日期: 2007-03-27

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目(50621403); 重庆市自然科学基金项目(CSCT2005BB7261)

作者简介: 孙大贵(1954~), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为环境化学及水处理技术, E-mail: daguisun@126.com

谱 HPLC 检测 PAEs 去除情况.

色谱条件为流动相: ACN/H₂O(75/25, 体积比), 1.000 mL·min⁻¹; UV 波长: 228 nm; 柱温: 30℃; 进样量: 20 μL.

各 PAEs 化合物的鉴别由保留时间确定, 用外标法定量, 以色谱峰面积对含量制作标准曲线, 用标准曲线法求各相应 PAEs 的含量. PAEs 的 HPLC 标准图谱见图 1.

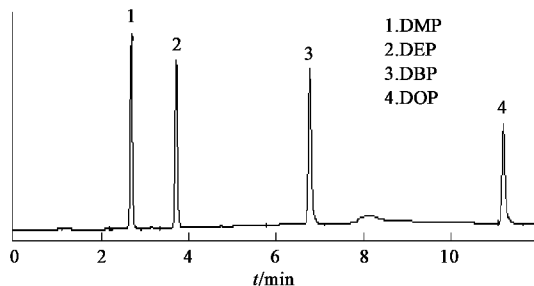


图 1 PAEs 的标准 HPLC 图

Fig. 1 Standard HPLC chart of PAEs

2 结果与讨论

2.1 H₂O₂ 用量对 PAEs 去除率的影响

PAEs 溶液 20 mL, 活性炭 1.0 g, Fe²⁺ 溶液 0.5 mL, 加入不同量的 H₂O₂ 溶液, 定容至 50 mL 并调节 pH 为 3, 处理时间为 15 h. 实验结果如图 2 所示.

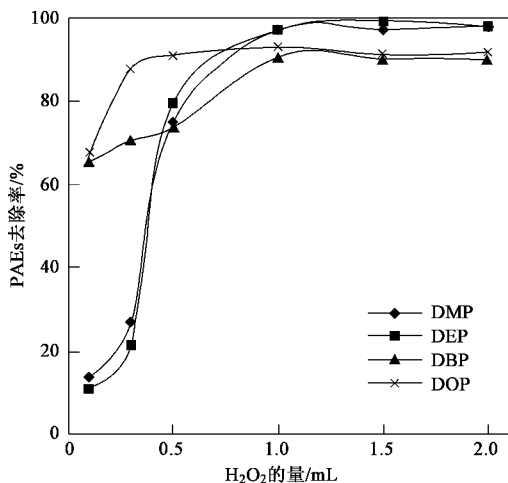
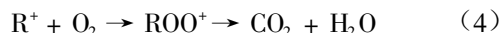
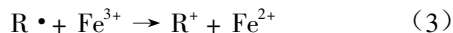
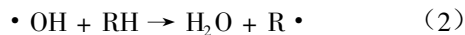
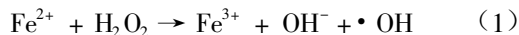


图 2 H₂O₂ 对 PAEs 去除率的影响

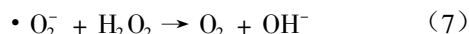
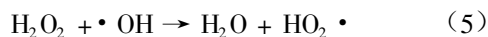
Fig. 2 Effect of H₂O₂ on PAEs removal ratio

由图 2 可知, 在实验条件下, 当 H₂O₂ 的加入量 < 1.0 mL 时, 增加 H₂O₂ 的量, PAEs 的去除率迅速增大, 但当加入 H₂O₂ 的量 > 1.0 mL 后, 继续增加 H₂O₂ 的量, PAEs 的去除率均变化不大. 根据 Fenton 试剂

的氧化-还原机理^[18,19], H₂O₂ 在 Fe²⁺ 的催化作用下发生均裂产生·OH, 从而引发和传播链反应, ·OH 进攻有机物 RH, 引起有机物自由基 R·的链引发、链传递, 从而使有机物结构发生碳链断裂, 最终被氧化为 CO₂ 和 H₂O. 其主要反应历程一般表示如下.



此反应为自由基反应, 当体系中 H₂O₂ 含量较少时, 反应(1)占主导地位, 随着 H₂O₂ 用量的增加, 产生的·OH 的量也增加, 使体系的氧化能力增强. 但当 H₂O₂ 的量达一定值后, 过量的 H₂O₂ 会捕获·OH 导致以下反应:



从而不仅使·OH 自由基的量减少, 而且使得链反应终止. 因此, 当 H₂O₂ 的量达一定值后, 再加入过量的 H₂O₂ 对 PAEs 去除率的影响不大.

2.2 Fe²⁺ 用量对 PAEs 去除率的影响

PAEs 溶液 20 mL, 活性炭 1.0 g, H₂O₂ 1.0 mL, 加入不同量的 Fe²⁺ 溶液, 定容至 50 mL 并调节 pH 为 3, 处理时间约为 15 h. 实验结果如图 3 所示.

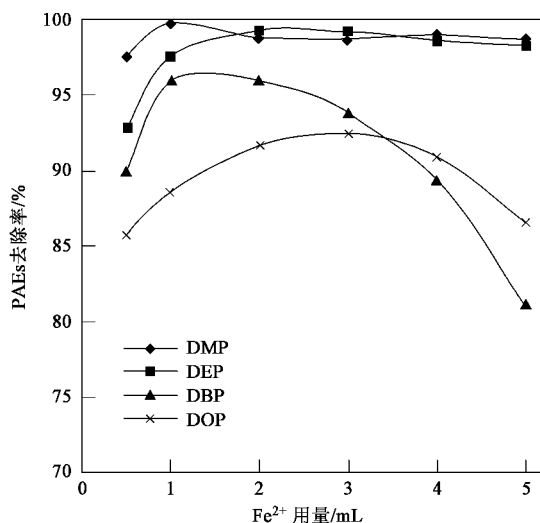
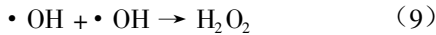
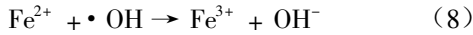


图 3 Fe²⁺ 对 PAEs 去除率的影响

Fig. 3 Effect of Fe²⁺ on PAEs removal ratio

由图 3 可知, 随着催化剂用量的增加去除率升高, 达到一定值后再增加催化剂用量, 去除率反而下降. Fe²⁺ 的存在是催化产生·OH 的必要条件, 当 Fe²⁺

的浓度过低时,反应(1)速度极慢.因此 $\cdot\text{OH}$ 的产量和生成速度都很小,降解过程受到抑制,随着 Fe^{2+} 浓度的升高,催化能力逐渐增强, $\cdot\text{OH}$ 的产量和生成速度逐渐增大,降解能力增强.但由于在链传递的过程中,有如下反应存在.



当 Fe^{2+} 浓度过高时,一方面因过量的 Fe^{2+} 迅速发生反应(8)消耗了一部分 $\cdot\text{OH}$;另一方面随着 Fe^{2+} 浓度增大,使反应(1)加快,产生 $\cdot\text{OH}$ 自由基浓度增大,增加了 $\cdot\text{OH}$ 自己碰撞的机会,反应(9)为自由基的复合反应,因为自由基是非常活泼的,复合时不需要破坏什么键,不需要吸收额外的能量,因此,这类反应的活化能为零,反应非常迅速,而反应(2)相对较慢,以致新生的 $\cdot\text{OH}$ 尚来不及与PAEs反应就被湮灭而使链传递中断,从而使得链的增长程度下降^[20,21].

2.3 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 的配比对PAEs去除率的影响

催化剂和氧化剂的配比是影响去除率的2个重要因素,因此,对每个因素分别取2个水平,采用 $L_4(2^2)$ 正交表优化降解实验条件.正交实验结果及分析见表1,其中PAEs去除率均为4种PAEs的平均去除率.

其中 K_1 、 K_2 分别表示各因素水平1、水平2两次实验所对应的PAEs去除率之和; k_1 、 k_2 分别表示各因素水平1、水平2两次实验所对应的PAEs去除率之和的平均值; R 表示各因素水平1、水平2两次实验所对应的PAEs的去除率之和的平均值之间的差异(级差).

PAEs溶液20 mL,活性炭1.0 g, pH为3,加入不同配比的 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液,定容50 mL.处理时间为15 h.实验结果如表1所示.

表1 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 的配比优化结果及分析

Table 1 Optimums results and analysis of $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ proportion

$L_4(2^2)$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{mL}$	Fe^{2+}/mL	去除率/%
1	0.5	1.0	97.1
2	0.5	2.0	94.4
3	1.5	2.0	94.5
4	1.5	1.0	99.1
K_1	191.5	196.2	
K_2	193.6	188.9	
k_1	95.8	98.1	
k_2	96.8	94.5	
R	1.0	3.6	

由表1可见,对反应影响的主次顺序为:催化剂

>氧化剂.催化剂 Fe^{2+} 的存在是产生 $\cdot\text{OH}$ 的重要条件,从实验2.1也说明, Fe^{2+} 浓度对实验结果影响最大,不论 Fe^{2+} 浓度过高或过低都会大大降低PAEs去除率.

由表1还可见, $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 的最佳配比为:30% H_2O_2 1.5 mL, Fe^{2+} 溶液1.0 mL时,PAEs的平均去除率达到99.1%.但考虑到处理成本,如果加入 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 的配比为:30% H_2O_2 0.5 mL, Fe^{2+} 溶液1.0 mL时,PAEs的平均去除率可达97.1%,也是可行的选择.

2.4 活性炭用量对PAEs去除率的影响

PAEs溶液20 mL, H_2O_2 1.0 mL, Fe^{2+} 溶液1.5 mL,加入不同量的活性炭,定容至50 mL并调节pH为3.处理时间为15 h.实验结果如图4.

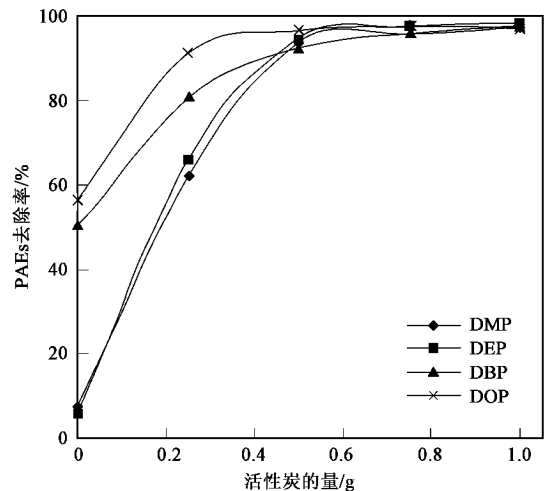


图4 活性炭对PAEs去除率的影响

Fig.4 Effect of active carbon on PAEs removal ratio

由图4可见,不加活性炭时,PAEs的去除率较低,其中DMP、DEP去除率仅分别为7.3%、5.2%,PAEs的去除率均随活性炭的加入量增大而增大,当活性炭的量达0.5 g时,PAEs去除率已达92%~96%,继续增加活性炭的量,PAEs去除率增加缓慢.当活性炭的量达1.0 g时,PAEs去除率可达97%~98.1%左右.实际应用中,活性炭用量增大,处理成本也增加,所以,从处理效果和成本2个方面考虑,活性炭的用量为0.5 g左右比较适宜.

2.5 pH对PAEs去除率的影响

PAEs溶液20 mL,活性炭1.0 g, H_2O_2 1.0 mL, Fe^{2+} 溶液1.0 mL,定容50 mL并调节在不同的pH值,处理15 h.实验结果如图5所示.

图5显示,DMP和DEP的去除率随pH值的变化不大,在pH为1~10范围内,均能达到99%以

上.而 DBP 和 DOP 的去除率则随 pH 值不同而变化较大.pH=2 时,去除率达到最大,pH 为 2~7 范围内,随着 pH 增大,PAEs 的去除率逐渐减小,pH>7 后,PAEs 的去除率又逐渐上升.

在酸性条件下, $\cdot\text{OH}$ 比其它常用的强氧化剂具有更高的氧化电极电位($\cdot\text{OH} + \text{H}^+ + \text{e}^- = \text{H}_2\text{O}$, $\varphi^\ominus = 2.8 \text{ V}$),在常见氧化剂中仅次于 F_2 ($\text{F}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{HF}$, $\varphi^\ominus = 3.06 \text{ V}$)而高于 O_3 ($\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\varphi^\ominus = 2.07 \text{ V}$).所以, $\cdot\text{OH}$ 容易氧化水中 PAEs 分子反应而使其降解.单独使用 Fenton 试剂时,一般 pH 为 3 左右时氧化能力最强.但已有研究证明,对于不同的处理体系其最佳 pH 值差别很大,因此,只有通过实验才能确定其最佳值^[22~24].一些特殊的组合处理体系由于协同作用在碱性条件下 Fenton 试剂也能很好地发挥作用.

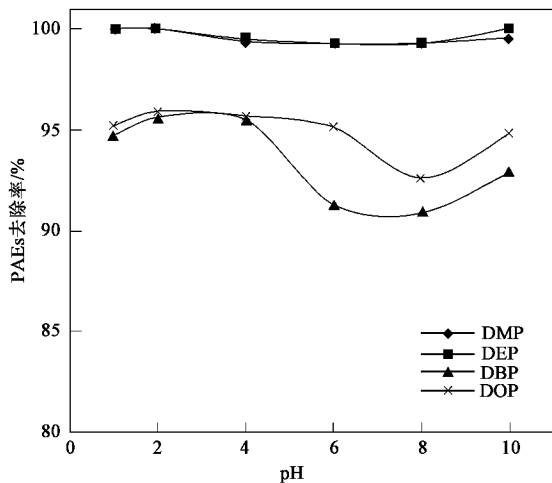


图 5 pH 值与 PAEs 去除率的影响

Fig.5 Effect of pH on PAEs removal ratio

2.6 反应时间对 PAEs 去除率的影响

PAEs 溶液 20 mL, H_2O_2 1.0 mL, Fe^{2+} 溶液 1.5 mL,活性炭 1.0 g,定容至 50 mL 并调节 pH 为 3,改变反应时间.实验结果如图 6 所示.

由图 6 可知,反应在起始阶段的 1~5 h 反应速度较快,尤其是 DOP,2 h 去除率就达到 93.8%.但随着时间的推移,反应物浓度下降,同时由于有难降解的中间产物的生成,造成反应速率下降,处理 15 h 后,去除率几乎不再变化.根据自由基反应的特点^[21],其反应历程包含链引发、链传递(链增长)、链终止 3 个阶段.反应开始时,链引发占主导地位,引发后链传递成为反应的主体,这时 PAEs 不断被消耗,形成反应产物,反应产物是传递阶段的一个环节,一经形成它不再作自由基的传递者,因此传递到

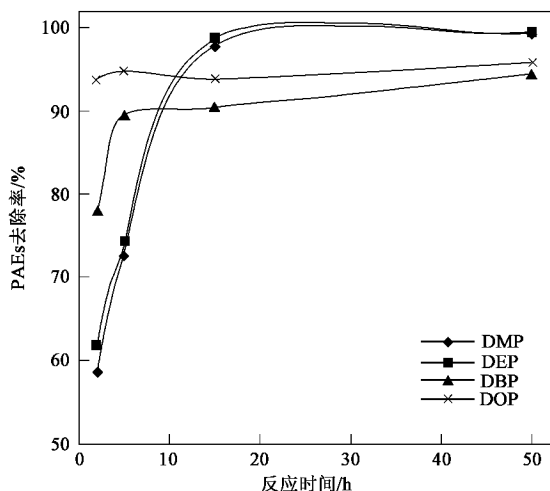


图 6 反应时间对 PAEs 去除率的影响

Fig.6 Effect of time on PAEs removal ratio

一定阶段,体系中的反应物浓度越来越小,自由基自己碰撞的机会越来越多,于是进入链终止阶段,在此阶段反应速度不能再保持链传递阶段那样稳定地生产物,自由基越来越少,最终反应停止.从反应时间来看,活性炭-Fenton 法处理 PAEs 的优化时间为 15 h.因此,可以进一步结合超声波或微波辐射相结合的组合方法以缩短废水处理时间,提高处理效率.

2.7 PAEs 初始浓度对 PAEs 去除率的影响

分别加入 PAEs 溶液 10、20、30、40 和 50 mL 得到不同初始浓度的 PAEs 溶液,按实验 2.7 的比例加入 H_2O_2 和 Fe^{2+} 溶液、活性炭,定容至 50 mL 并调节 pH 为 3.处理时间为 15 h.实验结果如图 7 所示.

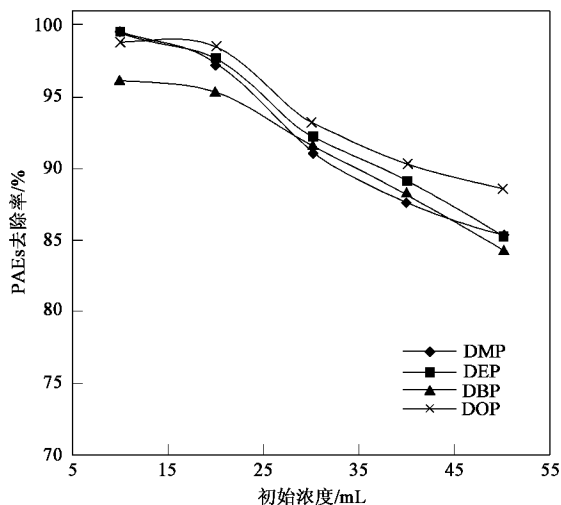


图 7 PAEs 的初始浓度对 PAEs 去除率的影响

Fig.7 Effect of initial PAEs concentration on PAEs removal ratio

可见,随着 PAEs 初始浓度的增大,其去除率相

应减小. 因为当溶液中 PAEs 初始浓度增大时, 虽然同样按比例增加了 H_2O_2 和 Fe^{2+} 溶液、活性炭的用量, 但一方面由于自由基的反应的特点, 反应体系中各物质的浓度均增大, 所产生各种自由基的浓度也相应增大, 自由基之间相互碰撞的机会也相应增多, 使得反应过早地进入链终止阶段, 从而 PAEs 的去除率下降. 另一方面, 反应物浓度增大, 虽然使被降解的 PAEs 分子数目增多, 但由于分子总数增多了, 去除率下降.

3 机理分析

对于活性炭/Fenton 催化氧化体系, 由于活性炭不仅具有巨大的比表面能, 具有优良的吸附能力, 而且活性炭表面含有大量的酸性或碱性基团. 酸性基团有羧基、酚羟基、醌型羰基、正内酯基及环氧式过氧基等; 碱性基团有似萘结构的苯并吡啶英翁 (pyzopyrylium) 的衍生物或类吡喃酮结构基团, 从而在活性炭表面形成了很多活性中心. 这些基团的存在使活性炭具有一定的催化作用, 使 H_2O_2 能在其表面分解放出原子态氧或生成 $\cdot\text{OH}$. 在酸性或碱性环境中活性炭表面的酸性或碱性基团的催化活性均能得到加强, 而在中性环境中催化活性被削弱^[25]. 因此, 由于 Fenton 试剂与活性炭的协同作用, 活性炭/Fenton 组合体系比单独使用 Fenton 试剂具有更广阔的 pH 值适用范围.

活性炭又具有还原性, 在分解 H_2O_2 的过程中, 自身表面能被氧化成具有氧化性能的含氧基团, 当水中的 PAEs 分子中的苯环首先被 $\cdot\text{OH}$ 进攻后, 降解成脂肪烃或链烃, 这些分子再与活性炭表面的含氧基团进一步反应, 甚至完全矿化.

4 结论

(1) 活性炭/Fenton 体系能有效地去除水中的邻苯二甲酸酯. 结果表明, 在 20 mL 含 DMP、DEP、DBP、DOP 各为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PAEs 溶液, 加入 30% H_2O_2 1.5 mL, $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe^{2+} 溶液 1.0 mL, 活性炭 1.0 g, 定容至 50 mL 并调节 pH 为 3, 处理 15 h. PAEs 的平均去除率达到 99.1%. 如果考虑到处理成本, 其它条件不变, 加入 0.5 mL H_2O_2 , 1.0 mL Fe^{2+} 溶液, PAEs 的平均去除率为 97.1%.

(2) 活性炭同时具有吸附能力和催化作用, 在酸性或碱性条件下, 活性炭表面的酸性或碱性基团的催化活性均能得到加强. 即使在 pH 值较高的条件

下, 仍然有较高的去除率. 采用活性炭/Fenton 体系处理 PAEs, 比单独使用 Fenton 试剂具有更加广阔的 pH 值适用范围, 在 Fenton 试剂与活性炭的协同作用下, PAEs 去除率大大提高.

参考文献:

- [1] Bauer M J, Herrmann R. Estimation of the Environmental Contamination by Phthalic Acid Esters Leaching from Household Waters [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **208**(12): 49 ~ 57.
- [2] 莫测辉, 吴启堂, 蔡全英, 等. 论城市污泥农用资源化与可持续发展 [J]. *应用生态学报*, 2000, **11**(1): 157 ~ 160.
- [3] 胡晓宇, 张克荣. 中国环境中邻苯二甲酸酯类化合物污染的研究 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2003, **13**(1): 9 ~ 14.
- [4] 曾峰, 傅家谟, 盛国英, 等. 邻苯二甲酸二丁酯的微生物降解 [J]. *环境科学*, 1999, **20**(5): 49 ~ 51.
- [5] 李魁晓, 顾继东. 邻苯二甲酸二甲酯的好氧生物降解及生化途径 [J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(2): 36 ~ 45.
- [6] 李文兰, 杨玉楠, 李宇彬, 等. 驯化活性污泥对邻苯二甲酸丁基苯酯的降解 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 156 ~ 159.
- [7] 施银桃, 李海燕, 曾庆福, 等. $\text{Mn}(\text{II})$ 催化臭氧氧化去除水中邻苯二甲酸二甲酯的研究 [J]. *武汉科技学院学报*, 2002, **15**(1): 39 ~ 42.
- [8] 周云端, 祝万鹏. Al_2O_3 催化臭氧氧化处理邻苯二甲酸二甲酯 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(1): 51 ~ 56.
- [9] 夏凤毅, 郑平, 周琪, 等. 7 种邻苯二甲酸酯的模拟曝气降解性研究 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(增刊): 11 ~ 15.
- [10] 胡晓宇. 水体中邻苯二甲酸酯光降解研究 [J]. *四川大学学报 (医学版)*, 2003, **34**(2): 300 ~ 302.
- [11] 刘军, 王珂, 贾瑞宝, 等. 臭氧-活性炭工艺对饮用水中邻苯二甲酸酯的去除 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(4): 77 ~ 80.
- [12] Ayranci E, Bayram E. Adsorption of phthalic acid and its esters onto high-area activated carbon-cloth studied by in situ UV-spectroscopy [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, **B122**: 147 ~ 153.
- [13] Adhoum N, Monsier L. Removal of phthalate on modified activated carbon: application to the treatment of industrial wastewater [J]. *Separation and Purification Technology*, 2004, **38**: 233 ~ 239.
- [14] 葛刚, 吴建彬. 邻苯二甲酸二辛酯废水的处理 [J]. *化工环保*, 2001, **21**(3): 149 ~ 152.
- [15] 闵怀, 傅亮, 陈泽军. Fenton 法及其在废水处理中的应用研究 [J]. *环境污染与防治*, 2004, **26**(1): 28 ~ 30.
- [16] 陶长元, 刘作华, 李晓红, 等. 超声波促进 Fenton 法脱色甲基橙溶液的研究 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(5): 111 ~ 114.
- [17] 陶长元, 向赞, 刘仁龙, 等. 微波和微波 Fenton 组合法处理渗滤液的对比 [J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2006, **26**(4): 18 ~ 20.
- [18] 田依林, 李明玉, 马同森, 等. Fenton 试剂氧化水中芳香族化合物的机理 [J]. *污染防治技术*, 2003, **16**(1): 12 ~ 15.
- [19] 陈传好, 谢波, 任源, 等. Fenton 试剂处理废水中各影响因子的作用机制 [J]. *环境科学*, 2000, **21**(3): 93 ~ 96.
- [20] 傅献彩, 沈文霞, 姚天扬. 物理化学 [M]. (第四版). 北京: 高

- 等教育出版社, 1990. 754 ~ 763.
- [21] 王积涛. 高等有机化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1980. 289 ~ 290.
- [22] 程沧沧, 肖忠海, 胡德文, 等. UV-TiO₂-Fenton 试剂系统处理制药废水的研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(2): 33 ~ 35.
- [23] 左晨燕, 何苗, 张彭义, 等. Fenton 氧化/混凝协同处理焦化废水生物出水的研究[J]. 环境科学, 2006, 27(11): 2201 ~ 2205.
- [24] 杨新萍, 王世和. Fenton 试剂处理有机氯农药废水的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(6): 60 ~ 64.
- [25] 李启良, 陈建林, 杨凯. 活性炭-H₂O₂ 催化氧化处理氨基 C 酸工业废水的研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(3): 446 ~ 450.

2006 年环境科学技术类期刊总被引频次和影响因子排序表¹⁾

(中国科学技术信息研究所 2007 年 11 月 15 日发布)

代码	期刊名称	总被引频次			影响因子		
		数值	学科排名	离均差率	数值	学科排名	离均差率
Z027	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES	352	26	-0.61	0.406	22	-0.40
Z549	安全与环境学报	563	21	-0.37	0.744	13	0.11
Z029	长江流域资源与环境	811	12	-0.09	0.830	11	0.23
Z024	城市环境与城市生态	611	18	-0.32	0.301	27	-0.55
Z015	电镀与环保	330	27	-0.63	0.444	20	-0.34
Z544	防灾减灾工程学报	99	31	-0.89	0.348	26	-0.48
Z013	工业水处理	1 021	10	0.14	0.406	22	-0.40
Z032	工业用水与废水	288	28	-0.68	0.207	31	-0.69
Z010	海洋环境科学	642	15	-0.28	0.653	14	-0.03
Z009	化工环保	595	19	-0.34	0.944	7	0.40
Z017	环境保护科学	274	29	-0.69	0.246	30	-0.63
Z005	环境工程	569	20	-0.36	0.371	25	-0.45
Z004	环境科学	2 899	1	2.24	1.310	3	0.95
Z003	环境科学学报	2 362	2	1.64	1.076	5	0.60
Z002	环境科学研究	1 141	8	0.27	1.089	4	0.62
Z025	环境科学与技术	687	14	-0.23	0.397	24	-0.41
Z019	环境污染与防治	701	13	-0.22	0.462	19	-0.31
Z021	环境污染治理技术与设备	1 503	6	0.68	0.550	16	-0.18
Z008	农业环境科学学报	1 779	5	0.99	0.879	8	0.31
H784	生态环境	975	11	0.09	0.837	10	0.24
Z023	生态与农村环境学报	627	16	-0.30	0.838	9	0.25
Z016	水处理技术	614	17	-0.31	0.268	29	-0.60
Z007	四川环境	419	25	-0.53	0.413	21	-0.39
T953	消防科学与技术	254	30	-0.72	0.291	28	-0.57
Z551	植物资源与环境学报	517	23	-0.42	0.638	15	-0.05
G129	中国安全科学学报	1 060	9	0.18	0.828	12	0.23
Z030	中国环境监测	445	24	-0.50	0.480	18	-0.29
Z001	中国环境科学	2 045	3	1.28	1.062	6	0.58
Z546	中国人口资源与环境	518	22	-0.42	0.513	17	-0.24
Z022	资源科学	1 152	7	0.29	1.350	2	1.01
Z012	自然资源学报	1 926	4	1.15	1.675	1	1.49
平均值		896			0.673		

1) 数据源于: 中国科学技术信息研究所. 2007 年版中国科技期刊引证报告(核心版)[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2007. 212.

2) 《环境科学》2002 ~ 2007 连续 6 年荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.