

Performance and mechanism of ozonation of bisphenol A

Jiaoyu CHEN¹, Guanhua MENG^{1,2*}, Wang WEI¹, Baohe LIU¹, Suyun DING¹, Jiarui HE¹

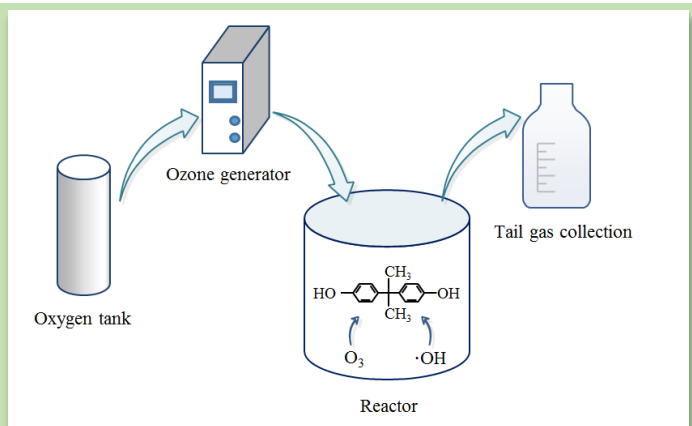
1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243000, China

2. Ministry of Education Biofilm Process Water Purification and Utilization Technology Engineering Research Center, Ma'anshan, Anhui 243000, China

Abstract: The wide application of bisphenol A (BPA) affects all aspects of human life, and bisphenol A has potential harm to human health. Ozonation has a rapid rate of reaction in the degradation of organic pollutants and no secondary pollution. In this work, the degradation of bisphenol A in aqueous solution by continuous ozone from the ozone generator was studied. The effects of ozone concentration, influent flow rate, pH, initial concentration of bisphenol A and temperature on the ozonation of BPA were investigated. And the

reaction mechanism of ozonation of bisphenol A was explored. The results showed that ozonation had a good removal effect on bisphenol A from contaminated water. The conditions for ozonation of bisphenol A were obtained by ozone concentration of 11.04 mg/L, flow rate of 2 mL/min, raw water pH at 6.83, loaded temperature 40 °C, initial concentration of bisphenol A 10 mg/L, the removal rate of bisphenol A reached up to 86.12%. Appropriate temperature rise promoted ozone degradation of bisphenol A and increase the removal rate of bisphenol A. The appropriate increase of ozone dosage increased the removal rate of bisphenol A. Ozonation of bisphenol A was a rapid reaction with low activation energy. The increase of pH reduced the removal rate of bisphenol A, and ozone degradation of bisphenol A was better under acidic conditions. The removal rate of bisphenol A decreased with the increase of flow rate. When the ozone dose was constant, the increase of initial concentration of bisphenol A resulted in a decrease of the removal rate of bisphenol A. Tert-butanol inhibited the production of hydroxyl radicals and reduced the removal rate of bisphenol A, but its concentration had little effect on the removal rate of bisphenol A. Ozonation of bisphenol A was mainly caused by direct oxidation of ozone and there was also indirect oxidation of hydroxyl radicals.

Key words: bisphenol A; advanced oxidation; ozone; reaction mechanism



收稿: 2019-03-11, 修回: 2019-06-27, 网络发表: 2019-07-19, Received: 2019-03-11, Revised: 2019-06-27, Published online: 2019-07-19

基金项目: 安徽高校自然科学研究重点项目(编号: KJ2017A065); 2017 年度高校优秀骨干青年人才国内外访学研修项目(编号: gxfx2017019)

作者简介: 陈娇玉(1996-), 女, 安徽省蚌埠市人, 硕士研究生, 环境科学与工程专业, Tel: 18395562942, E-mail: 1283442064@qq.com; 孟冠华, 通讯联系人, E-mail: mengguanhua@163.com.

引用格式: 陈娇玉, 孟冠华, 魏旺, 等. 臭氧氧化双酚 A 的性能及机理. 过程工程学报, 2020, 20(2): 230-236.

Chen J Y, Meng G H, Wei W, et al. Performance and mechanism of ozonation of bisphenol A (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(2): 230-236, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219165.

臭氧氧化双酚A的性能及机理

陈娇玉¹, 孟冠华^{1,2*}, 魏旺¹, 刘宝河¹, 丁素云¹, 何佳睿¹

1. 安徽工业大学环境工程系, 安徽 马鞍山 243000

2. 教育部生物膜法水质净化及利用技术工程研究中心, 安徽 马鞍山 243000

摘要: 采用臭氧氧化法在动态条件下降解双酚A, 考察了臭氧浓度、水样进水流速、pH、双酚A初始浓度及温度对氧化降解双酚A效果的影响, 探究了臭氧氧化双酚A的反应机理。结果表明, 臭氧对溶于水中的双酚A具有良好的去除效果, 在反应条件(臭氧浓度 11.04 mg/L、水样进水流速 2 mL/min、原水 pH=6.83、双酚A初始浓度 10 mg/L、温度 40℃)下, 去除率达 86.12%。增加臭氧浓度或适当升高温度可增加臭氧氧化双酚A去除率。pH和进水流速的提高会降低双酚A去除率。偏酸性条件下, 臭氧降解双酚A的效果更好。臭氧氧化双酚A反应活化能较低, 属于快速反应。臭氧浓度不变, 增加双酚A初始浓度会使其去除率减小。臭氧氧化双酚A以臭氧直接氧化为主, 同时也存在羟基自由基间接氧化。

关键词: 双酚A; 高级氧化; 臭氧; 反应机理

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)02-0230-07

1 前言

双酚A (Bisphenol A, BPA)是环境中普遍存在的雌激素之一, 用于生产聚碳酸酯、酚类物质和环氧树脂等, 在工业生产和生活消费品中有广泛应用^[1]。近年来, 我国双酚A产能不断增长, 2011~2017年消费量年均增长率约为6.5%, 2017年年底总产能达143万吨^[2]。2017年, 双酚A被欧洲化学品管理局(ECHA)正式认定为内分泌干扰物, 其主要通过口服摄入或其它潜在接触源(如皮肤接触等)^[3]与人体接触, 严重影响人体健康^[4-6]。

双酚A普遍存在于水、土壤及沉积物等环境中, 具有难降解、半挥发性、易长距离迁移、易生物积累及高毒性^[7]。目前双酚A的处理技术有物理吸附^[8]、生物降解^[1,9]和高级氧化技术^[10]等。物理吸附与生物降解易造成二次污染, 高级氧化技术因可以彻底矿化难降解有机物、反应迅速、处理效率高、无二次污染等^[10-13], 受到广泛关注。高级氧化技术主要包括光化学氧化法、臭氧氧化法、Fenton法、光Fenton法和超声氧化法等。其中, 臭氧氧化法既可单独使用, 也可与其它方法联用, 臭氧对污染物的降解几乎没有选择性、反应迅速、操作便捷, 去除难降解有机物效果良好。Mansouri等^[11]在邻苯二甲酸二乙酯浓度为10 mg/L、初始pH=7.0时, 以臭氧为基础的高级氧化法降解目标物, 去除率达90%以上。Liao等^[12]在还原性氧化石墨烯催化条件下, 15 min内TiO₂光催化臭氧氧化降解双酚A效率达95%。Keykavoos等^[13]以氧化铝为催化剂, 催化臭氧氧化双酚

A去除率达90%。近年来国内外学者^[14-16]在静态条件下以臭氧为基础对高级氧化技术进行了许多研究, 而本研究在动态条件下, 考察了各因素对臭氧氧化双酚A的影响, 探讨了臭氧氧化双酚A的反应机理。

2 实验

2.1 材料与试剂

双酚A、碘化钾(KI)、叔丁醇、硫代硫酸钠(Na₂S₂O₃)均为分析纯, 购于国药集团化学试剂有限公司。

2.2 实验装置与分析仪器

用CF-G-3-5型臭氧发生器(青岛国林实业有限责任公司)产生臭氧, 用LA-pH10型精密pH计(美国哈希公司)测定pH, 通过BSZ-40型自动部分收集器(上海沪西仪器分析厂有限公司)收集水样, 用TU-1901型双光束紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)测定吸光度, 得到双酚A浓度。

2.3 实验方法

臭氧氧化降解双酚A流程如图1所示。采用动态连续法, 在连续动态进出水的条件下, 通过臭氧发生器连续提供臭氧。实验开始前向装有超纯水的反应柱内通入10 min臭氧, 以去除其中的杂质, 然后加入实验室配置模拟的双酚A废水溶液, 开启恒流泵。反应开始后用自动采样器每隔5 min取样一次, 并向样品中滴加适量Na₂S₂O₃以终止样品中残留的臭氧与废水继续反应。

采用单因素法确定反应条件, 考察臭氧氧化降解双

酚 A 的影响因素, 用紫外-可见分光光度计计算双酚 A 去除率。利用碘量法, 通过臭氧与碘化钾 KI 的反应测定臭氧浓度。

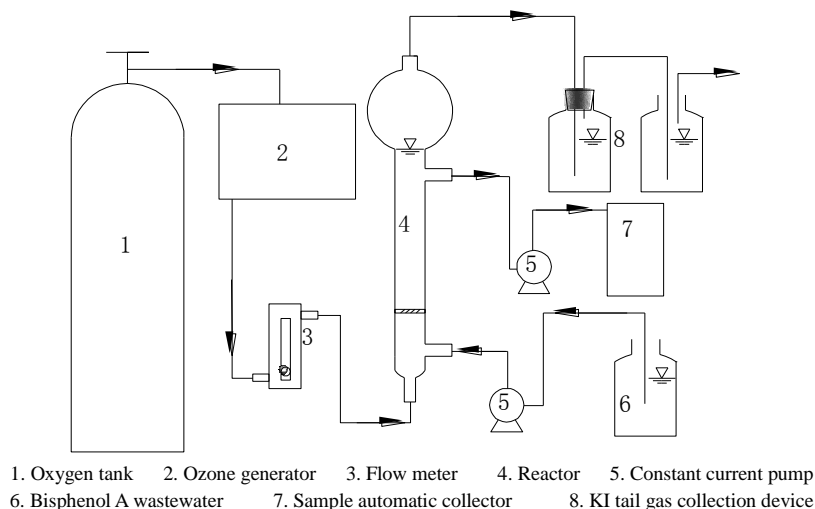


图 1 臭氧氧化降解双酚 A 流程图

Fig.1 Flow chart of ozone oxidative degradation of bisphenol A

3 结果与讨论

固定实验条件为臭氧浓度 7.97 mg/L, 双酚 A 水样进水流速 4 mL/min, 原水 pH=6.83, 双酚 A 初始浓度 10 mg/L, 温度 20 °C。改变单一因素考察其对双酚 A 去除率的影响, 每隔 5 min 对出水进行取样, 反应时间为 40 min。

3.1 臭氧浓度对双酚 A 去除率的影响

臭氧通入流速分别为 10, 15, 20 和 25 mL/min, 即臭氧浓度分别为 6.01, 7.97, 9.75 和 11.04 mg/L 时, 双酚 A 去除率随臭氧浓度的变化如图 2 所示。由图可知, 双酚 A 的去除率随臭氧浓度增加而逐渐增大。臭氧浓度为

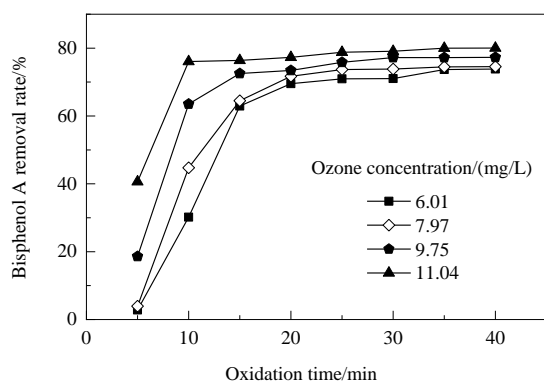


图 2 臭氧浓度对双酚 A 去除率的影响

Fig.2 Effect of ozone concentration on bisphenol A removal rate

11.04 mg/L 时, 稳定后臭氧氧化双酚 A 去除率达 80.04% (40 min 时)。臭氧浓度为 6.01 和 7.97 mg/L 时, 反应至 20 min 时双酚 A 去除率逐渐稳定, 臭氧浓度为 9.75 和 11.04 mg/L 时, 反应 15 min 时趋于稳定, 原因是臭氧浓度升高时水样中溶解的臭氧量增加^[17], 臭氧量充足时其与双酚 A 快速反应, 达到稳定的时间短。随臭氧浓度增加和反应时间延长, 臭氧利用率逐渐降低; 而随反应时间延长, 溶液中双酚 A 浓度降低, 臭氧进一步氧化双酚 A 降解中间产物^[18], 因此反应进入稳定阶段后双酚 A 去除率的增幅逐渐减小。

3.2 流速对双酚 A 去除率的影响

在双酚 A 水样进水流速分别为 2, 3, 4 和 5 mL/min 条件下, 双酚 A 的去除率随进水流速的变化如图 3 所示。由图可知, 随双酚 A 水样进水流速增大, 双酚 A 去除率逐渐减小。进水流速为 2 mL/min 时, 稳定后双酚 A 去除率为 83.06%; 进水流速增至 5 mL/min 时, 双酚 A 去除率降至 74.59%。原因是水样进水流速增大时, 双酚 A 在反应器内停留时间较短, 臭氧与双酚 A 接触反应时间减少, 臭氧利用率低。流速较小时双酚 A 去除率更高, 但水样在反应器内停留时间长, 反应能耗增加, 综合考虑选择流速为 4 mL/min。

3.3 pH 对双酚 A 去除率的影响

在原水 pH=6.83 条件下, 调节溶液 pH 分别为 3, 5, 7, 9 和 11, 双酚 A 去除率随 pH 的变化见图 4。由图可知, 双酚 A 去除率随 pH 增大而降低, pH=3 时, 双酚 A 去

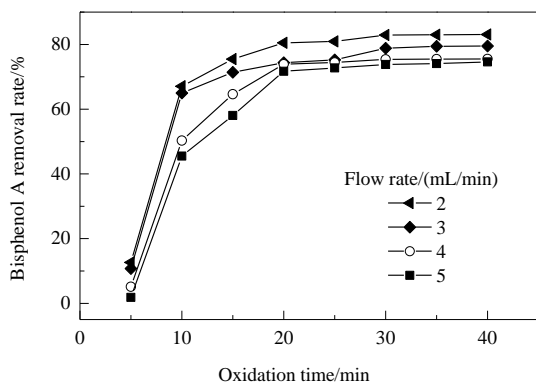


图3 水样进水流速对双酚A去除率的影响

Fig.3 Effect of influent flow rate on bisphenol A removal rate

除率最高,为 79.23% (40 min 时),原因可能是 pH 对 $\cdot\text{OH}$ 的氧化电位有一定影响,臭氧因氧化电位与 pH 的相互关系而产生自由基^[19],酸性条件下以直接氧化有机物为主,碱性条件下以羟基自由基 $\cdot\text{OH}$ 氧化为主^[20],因此推测此时臭氧氧化双酚 A 反应过程以臭氧直接氧化为主。pH=11 时双酚 A 去除率明显降低,可能是碱性条件下生成 $\cdot\text{OH}$ 速度增加,但与溶液中臭氧含量相比仍较少,此时臭氧氧化双酚 A 的反应仍以直接氧化为主,而碱性条件加速了臭氧在传质过程中的分解,导致臭氧利用率降低^[21];另一方面, $\cdot\text{OH}$ 较多时可能自分解^[22],由于 $\cdot\text{OH}$ 的无选择性,其氧化双酚 A 的同时也可能氧化反应中间产物,导致双酚 A 去除率降低。原水与调节 pH=7 时的溶液臭氧对双酚 A 去除效果几乎相同,出于经济与稳定性考虑,选择原水 pH 条件考察其它影响因素。

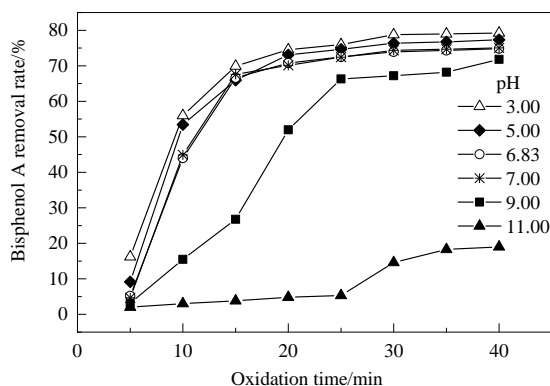


图4 pH对双酚A去除率的影响

Fig.4 Effect of pH on bisphenol A removal rate

3.4 双酚A初始浓度对其去除率的影响

双酚 A 初始浓度分别为 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 mg/L 时,其去除率随初始浓度的变化如图 5 所示。由图可知,随双酚 A 初始浓度增大,其去除率逐渐降低,当浓度为

5.0 mg/L 时的去除率为 84.92% (40 min 时),而浓度提高到 12.5 mg/L 时去除率降到 75.36%,原因是双酚 A 的初始浓度增加,没有充足的臭氧氧化双酚 A,导致其去除率下降。

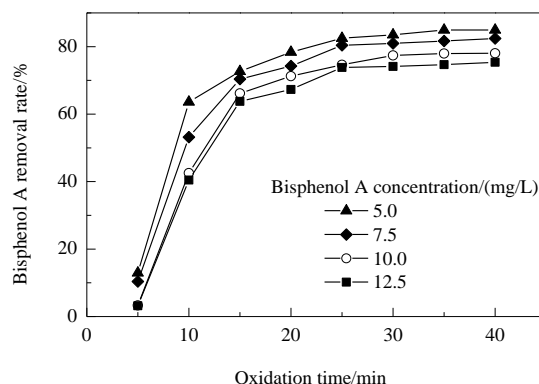


图5 双酚A初始浓度对其去除率的影响

Fig.5 Effect of initial concentration of bisphenol A on its removal rate

3.5 温度对双酚A去除率的影响

调节温度分别为 20, 30 和 40℃,双酚 A 去除率随温度的变化如图 6 所示。由图可知,双酚 A 去除率随温度升高而增加,40℃时去除率为 83.66% (40 min 时)。温度由 30℃升至 40℃时,双酚 A 去除率增幅不大,原因可能是由于温度升高导致臭氧在溶液中的溶解量减少。

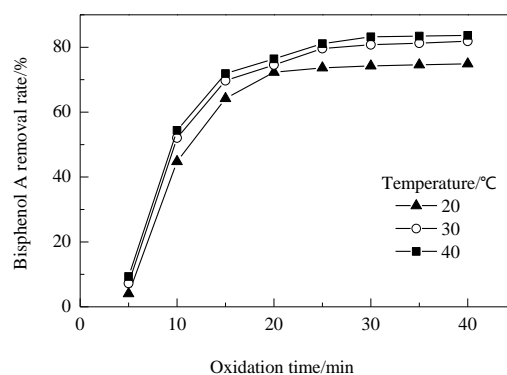


图6 温度对双酚A去除率的影响

Fig.6 Effect of temperature on bisphenol A removal rate

t 时刻时双酚 A 浓度为 C , 双酚 A 初始浓度为 C_0 , 将 $\ln(C/C_0)$ 与 t 进行线性拟合。0~20 min 时反应快速进行, 20, 30 和 40℃时的反应速率常数 k 分别为 0.083, 0.087 和 0.090 min^{-1} ; 20~40 min 时反应基本稳定, 20, 30 和 40℃时的反应速率常数 k 分别为 0.0031, 0.0075 和

0.0089 min^{-1} 。

由 Arrhenius 方程:

$$\ln k = \frac{-E_a}{RT} + \ln A$$

式中, k 为温度 t 时的反应速度常数(min^{-1}), T 为热力学温度(K), R 为气体常数[$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$], E_a 为活化能(J/mol), A 为指前因子, 即阿伦尼乌斯常数。将 $\ln k$ 与 T^{-1} 线性拟合, 结果表明臭氧氧化双酚 A 的活化能在 0~20 min 时为 25 kJ/mol, 20~40 min 时为 21 kJ/mol。氧化反应的活化能一般为 70~170 kJ/mol^[23], 臭氧氧化双酚 A 所需活化能较小, 反应较易进行, 属于快速反应。

3.6 自由基猝灭实验

在臭氧浓度 11.04 mg/L、水样进水流速 2 mL/min、原水 pH=6.83、双酚 A 初始浓度 10 mg/L、温度 40℃ 的条件下, 分别投加 0, 0.5 和 1.0 g/L 叔丁醇, 每隔 5 min 对出水进行取样, 反应时间为 40 min, 双酚 A 去除率随叔丁醇浓度变化如图 7 所示。由图可知, 叔丁醇浓度为 0, 0.5 和 1.0 g/L 时, 40 min 时双酚 A 去除率分别为 86.12%, 84.09% 和 82.21%, 叔丁醇可降低双酚 A 去除率, 但其浓度对双酚 A 去除率影响不大。叔丁醇可与羟基自由基·OH 反应, 是·OH 的抑制剂^[24], 能降低溶液中·OH 含量, 由此可知臭氧氧化双酚 A 以臭氧直接氧化为主, 与谢兆倩等^[25]研究叔丁醇对臭氧氧化双酚 A 的影响结果一致。

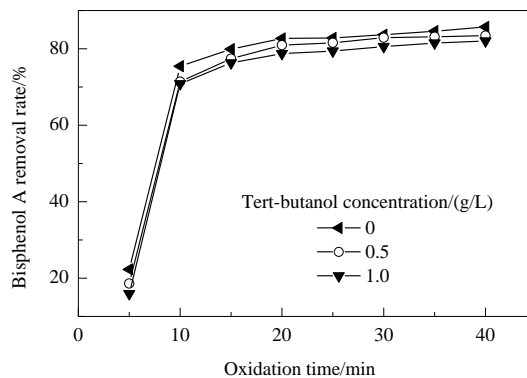
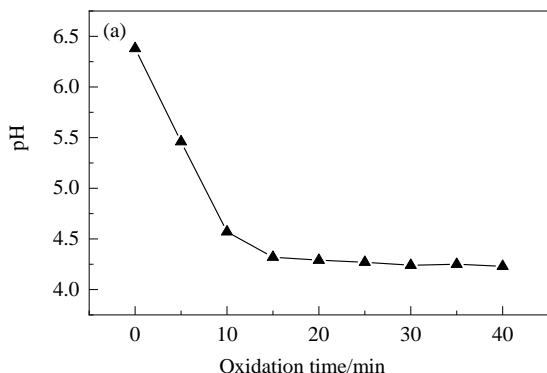


图 7 叔丁醇对双酚 A 去除率的影响

Fig.7 Effect of tert-butanol on bisphenol A removal rate

3.7 臭氧氧化双酚 A 降解机理及动力学分析

为了进一步探究臭氧氧化降解双酚 A 的降解机理, 分别考察了臭氧氧化双酚 A 中 pH 和化学需氧量(COD)去除率的变化, 结果如图 8 所示。由图 8(a)可知, 在臭氧氧化降解双酚 A 过程中, 溶液 pH 值在短时间内快速降低后逐渐趋于稳定, 最终稳定在偏酸性条件下。原因是最初 20 min 内, 臭氧降解双酚 A 生成了羧酸类中间产物^[20], 导致溶液 pH 值下降, 随反应进行中间产物进一步分解, 溶液 pH 趋于稳定。由图 8(b)可知, 溶液中 COD 去除率随时间延长逐渐增大, 但整体偏低, 表明双酚 A 的降解产物可能大部分以有机酸等形式留在溶液中, 少部分最终氧化为 CO_2 和 H_2O 。

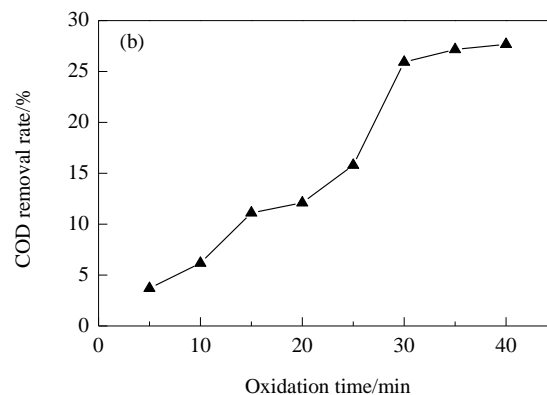


图 8 双酚 A 降解过程中 pH 和 COD 去除率的变化

Fig.8 Changes of pH and COD removal rate during the degradation of bisphenol A

溶液中臭氧浓度过量且保持稳定, 对臭氧氧化降解双酚 A 采用下式伪一级动力学方程进行拟合^[26]:

$$C_0 = Ce^{k_c \cdot t}$$

式中, C_0 为双酚 A 初始浓度(mol/L), C 为双酚 A 随时间变化浓度(mol/L), k_c 为双酚 A 反应动力学常数(min^{-1}),

t 为反应时间(min)。结合实际生产特点和经济因素影响, 选定条件为臭氧浓度 7.97 mg/L, 水样进水流速 4 mL/min, 原水 pH=6.83, 双酚 A 初始浓度 $C_0=10 \text{ mg/L}$, 温度 20℃, 结果如图 9 所示。将反应过程分段拟合, 发现伪一级动力学模型可以较好地模拟双酚 A 的降解过程。0~20 min 时反应快速进行, 双酚 A 迅速被降解

成羧酸类中间产物, 在 20~40 min 时反应动力学常数减小, 此时中间产物被进一步分解, 反应逐渐稳定。

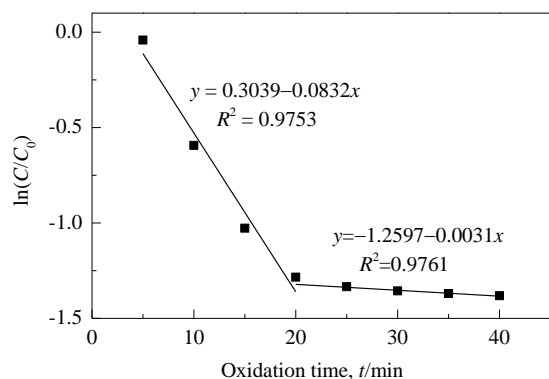


图 9 双酚 A 降解分段动力学拟合曲线

Fig.9 Two stage kinetics for degradation of bisphenol A

4 结 论

在动态条件下研究臭氧氧化降解双酚 A 的过程, 考察了实验中的影响因素, 得到以下结论:

(1) 连续臭氧氧化降解双酚 A 反应条件为臭氧浓度 11.04 mg/L、水样流速 2 mL/min、原水 pH=6.83、双酚 A 初始浓度 10 mg/L、温度 40 °C 时, 双酚 A 去除率达 86.12%。

(2) 臭氧氧化降解双酚 A 的效果随臭氧浓度增加而增大、随水样流速增大而减小; 偏酸性条件下去除效果更好; 适当升高温度可提高去除率。

(3) 臭氧氧化降解双酚 A 中存在臭氧直接氧化和羟基自由基间接氧化, 以臭氧直接氧化为主, 降解过程符合伪一级动力学模型。

参考文献

- [1] Cydzik-Kwiatkowska A, Bernat K, Zielińska M, et al. Aerobic granular sludge for bisphenol A (BPA) removal from wastewater [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 122: 1–11.
- [2] 陈云峰, 杨志宝, 柳延峰, 等. 双酚 A 的生产及市场情况分析 [J]. *化学工业*, 2018, 36(3): 42–47.
Chen Y F, Yang Z B, Liu Y F, et al. Production and market analysis of bisphenol A in domestic [J]. *Chemical Industry*, 2018, 36(3): 42–47.
- [3] Toner F, Allan G, Beyer D, et al. *In vitro* percutaneous absorption and metabolism of bisphenol A (BPA) through fresh human skin [J]. *Toxicology in Vitro*, 2018, 47: 147–155.
- [4] Huang Y Q, Wong C K C, Zheng J S, et al. Bisphenol A (BPA) in China: a review of sources, environmental levels, and potential human health impacts [J]. *Environment International*, 2012, 42(S1): 91–99.
- [5] Desai M, Ferrini M G, Han G, et al. *In vivo* maternal and *in vitro* BPA exposure effects on hypothalamic neurogenesis and appetite regulators [J]. *Environmental Research*, 2018, 164: 45–52.
- [6] Elmetwally M A, Halawa A A, Lenis Y Y, et al. Effects of BPA on expression of apoptotic genes and migration of ovine trophectoderm (oTr1) cells during the peri-implantation period of pregnancy [J]. *Reproductive Toxicology*, 2019, 83: 73–79.
- [7] Bhatnagar A, Anastopoulos I. Adsorptive removal of bisphenol A (BPA) from aqueous solution: a review [J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 885–902.
- [8] 王婧. 分子印迹磁性吸附材料的制备及其吸附双酚 A 的效能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 8–11.
Wang J. Preparation of magnetic molecularly imprinted materials for selective monitoring and its adsorption properties of bisphenol A [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 8–11.
- [9] 顾雍. 生物降解及过硫酸盐氧化去除典型酚类有机污染物的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2018: 16–17.
Gu Y. Research on biodegradation and persulfate oxidation process for removing typical phenolic organic pollutants [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018: 16–17.
- [10] Chong M N, Sharma A K, Burn S, et al. Feasibility study on the application of advanced oxidation technologies for decentralised wastewater treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 35: 230–238.
- [11] Mansouri L, Tizaoui C, Geissen S, et al. A comparative study on ozone, hydrogen peroxide and UV based advanced oxidation processes for efficient removal of diethyl phthalate in water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 363: 401–411.
- [12] Liao G Z, Zhu D Y, Zheng J X, et al. Efficient mineralization of bisphenol A by photocatalytic ozonation with TiO₂-graphene hybrid [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 67: 300–305.
- [13] Keykavous R, Mankidy R, Ma H, et al. Mineralization of bisphenol A by catalytic ozonation over alumina [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 107: 310–317.
- [14] Lai Y, Yang L Y. Research progress of water treatment by advanced oxidation technology [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 864/865/866/867: 2096–2099.
- [15] Mansouri L, Tizaoui C, Geissen S, et al. A comparative study on ozone, hydrogen peroxide and UV based advanced oxidation processes for efficient removal of diethyl phthalate in water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 363: 401–411.
- [16] Sharma A, Ahmad J, Flora S J S. Application of advanced oxidation processes and toxicity assessment of transformation products [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 167: 223–233.
- [17] Garoma T, Matsumoto S. Ozonation of aqueous solution containing bisphenol A: effect of operational parameters [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/2/3): 1185–1191.
- [18] Sevimli M F, Sarikaya H Z. Ozone treatment of textile effluents and dyes: effect of applied ozone dose, pH and dye concentration [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2002, 77(7): 842–850.
- [19] Ebrahimi E E, Al-Maghrabi M N, Mobarki A R. Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-Fenton oxidation technology [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2013, 35(S2): 1–13.
- [20] Dietrich M, Franke M, Stelter M, et al. Degradation of endocrine disruptor bisphenol A by ultrasound-assisted electrochemical oxidation in water [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 39:

- 741–749.
- [21] 侯甲才. 臭氧化降解水中双酚 A 的效能及动力学 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2014: 22–24.
Hou J C. Degradation efficiency and kinetics during ozonation of bisphenol A in aqueous solution [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014: 22–24.
- [22] 韩琦, 王宏杰, 董文艺, 等. 高铁酸盐和臭氧氧化法降解水中双酚 A 的研究 [J]. 工业用水与废水, 2014, 45(5): 14–18.
Han Q, Wang H J, Dong W Y, et al. Degradation of bisphenol A in water through oxidation by ferrate and ozone [J]. Industrial Water & Wastewater, 2014, 45(5): 14–18.
- [23] 张凌, 陶莹, 常志显, 等. 臭氧法降解水中对甲基苯磺酸的动力学研究 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2185–2191.
Zhang L, Tao Y, Chang Z X, et al. Kinetics of p-toluene sulfonic acid degradation by ozone in aqueous solution [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(10): 2185–2191.
- [24] 吴光国, 谢勇冰, 邢林林, 等. 改性活性炭强化催化臭氧氧化降解草酸 [J]. 过程工程学报, 2012, 12(4): 684–689.
Wu G G, Xie Y B, Xing L L, et al. Enhanced catalytic ozonation of oxalic acid over modified activated carbon [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(4): 684–689.
- [25] 谢兆倩, 刘晨. 臭氧氧化降解水中双酚 A 的研究 [J]. 山东化工, 2018, 47(11): 190–192.
Xie Z Q, Liu C. Study on degradation of bisphenol A by ozone oxidation [J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(11): 190–192.
- [26] 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 等. 臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 [J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4185–4191.
Cao F, Yuan S J, Zhang M T, et al. Impact factors and degradation mechanism for the ozonation of acetaminophen in aqueous solution [J]. Environmental Science, 2014, 35(11): 4185–4191.