

文章编号: 1006-9941(2015)06-0589-05

超重力强化吹脱与 O_3/H_2O_2 联合处理含高浓度硝基苯废水

俸志荣^{1,2}, 焦伟洲^{1,2}, 刘有智^{1,2}, 郭亮^{1,2}, 许承聘^{1,2}, 余丽胜^{1,2}, 王永红^{1,2}

(1. 中北大学山西省超重力化工工程技术研究中心, 山西太原 030051; 2. 超重力化工过程山西省重点实验室, 山西太原 030051)

摘要: 为了降低废水中硝基苯含量, 首次构建了超重力强化的吹脱— O_3/H_2O_2 氧化处理工艺。进行了超重力强化的吹脱法预处理含高浓度硝基苯的废水。考察了超重力因子 β 、气体流量 G 、液体流量 L 等因素对硝基苯吹脱率的影响。结果表明: 结合超重力技术可有效提高硝基苯去除率, 当 $G=10\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $L=90\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $\beta=80$ 时, 吹脱 10 次后硝基苯含量降至 $90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 此后吹脱率变化明显减弱。低浓度废水用超重力强化的 O_3/H_2O_2 高级氧化法进一步处理, 当 $L=120\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $\beta=80$, 气相 O_3 浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_2O_2 浓度为 $4.9\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 初始 pH 值为 10.5, 处理时间为 25 min 时, 硝基苯去除率可达 99.6%, 出水可生化系数 $BOD_5/COD_{Cr}=0.38$, 满足污水处理的生化处理标准。

关键词: 超重力; 过程强化; 吹脱; 硝基苯; O_3 ; H_2O_2

中图分类号: TJ55; X113

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.016

1 引言

火炸药废水主要来源于火炸药及其制备过程中的原料和中间产物, 其成分多为硝基苯类化合物, 如梯恩梯(TNT)、地恩梯(DNT)、硝基苯(NB)等^[1-2]。这类污染物往往化学性质稳定, 且不易被生物降解, 具有强烈的致癌致突变性, 已被多国列为优先控制污染物^[3-4]。

O_3/H_2O_2 高级氧化法由于不受废水种类、成分、浓度的限制, 且不会造成二次污染, 已成为废水处理领域研究的热点^[5-8]。对于含高浓度硝基苯类化合物废水而言, O_3/H_2O_2 法具有很好的处理效果, 但经济成本偏高, 不适于工业化应用推广。而空气吹脱法在含高浓度挥发性有机废水预处理阶段有着广泛的应用^[9-11], 处理高浓度时推动力大, 污染物脱除量大。由于空气吹脱法和 O_3/H_2O_2 高级氧化法中都存在传质过程^[12-13], 所以强化气液传质速率可大大提高硝基

苯吹脱率和 O_3 吸收速率^[14], 进而提高硝基苯去除率。旋转填料床(Rotating Packed Bed, RPB)通过旋转模拟超重力场, 是一种新型过程强化设备^[15-17]。在超重力场中液体被高速旋转的填料切割成细小的液滴、液丝和液膜, 气液相接触面积大幅提高^[18]; 并且液体被旋转的填料高频撞击, 气液相界面迅速更新, 有效地提高了气液传质速率^[19]。

基于此, 结合上述两种工艺自身特点, 并在吹脱— O_3/H_2O_2 氧化耦合工艺中结合超重力技术进行过程强化, 以硝基苯为模型污染物, 首次构建超重力吹脱— O_3/H_2O_2 氧化处理工艺, 探索工艺最佳耦合条件, 以为处理含高浓度硝基苯类化合物废水提供一种经济、高效的处理方法。

2 实验部分

2.1 实验试剂

硝基苯, 分析纯, 天津市科密欧化学试剂开发中心; H_2O_2 , 30%, 分析纯, 天津市天力化学试剂有限公司; 重铬酸钾, 分析纯, 上海浦江化工厂。

含硝基苯废水由硝基苯与去离子水配制, 初始 pH 值为 7.5, 硝基苯浓度为 $551.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $COD_{Cr}=1357.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2 实验装置

实验所用吹脱设备为逆流旋转填料床, 转子内径、外径、高度分别为 0.03, 0.064, 0.03 m。氧化降解采

收稿日期: 2014-11-08; 修回日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21206153); 山西省高等学校创新人才支持计划资助项目(201316); 山西省优秀青年基金(2014021007); 山西省研究生优秀创新项目(2014084)。

作者简介: 俸志荣(1989-), 男, 研究生, 主要从事超重力技术在火炸药废水处理方面的应用研究。e-mail: fzz2099@163.com

通信联系人: 焦伟洲(1981-), 男, 教授, 主要从事超重力技术在废水处理方面的基础应用研究。e-mail: jwz0306@126.com

用错流旋转填料床, 转子内径 0.04 m, 外径 0.075 m, 轴向高度 0.075 m。转子内填料均为不锈钢波纹丝网填料。

仪器设备: 美国戴安 Ultimate 3000 液相色谱仪; LBC-50W(S) 型臭氧发生器, 山东绿邦光电设备有限公司; 水样 COD_{Cr} 测试仪 XJ-I 型, 广东省医疗器械厂; 可见分光光度计 JK-721 型, 上海精科仪器有限公司; BOD 测定仪 ET99724-6, 德国-哈纳科技; PHS-3C 型精密酸度计。

2.3 实验过程

实验工艺流程如图 1 所示, 实验在室温 (20 ± 3) $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行。首先利用超重力-吹脱法对高浓度废水进行预处理, 处理后的废水再利用超重力- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 高级氧化法进行深度处理。

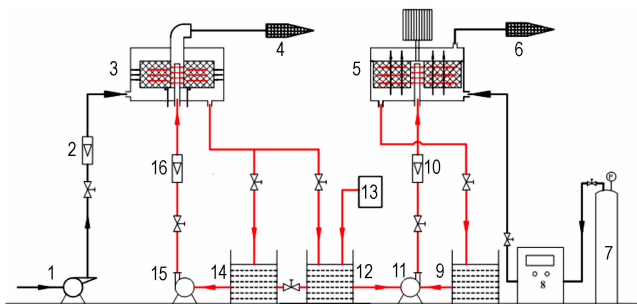


图 1 超重力吹脱- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 氧化处理耦合工艺流程图

1—风机, 2—气体流量计, 3, 5—旋转填料床, 4, 6—尾气处理装置, 7—氧气罐, 8—臭氧发生器, 9, 12, 14—储液槽, 10, 16—液体流量计, 11, 15—液泵, 13—外加 H_2O_2

Fig. 1 Flow diagram of air stripping- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ oxidation treatment coupling process enhanced by high gravity technology
1—blower, 2—gas flowmeter, 3, 5—rotating packed bed, 4, 6—offgas treating unit, 7—oxygen tank, 8—ozone generator, 9, 12, 14—liquid tank, 10, 16—liquid flowmeter, 11, 15—liquid pump, 13—extra H_2O_2

超重力-吹脱法处理阶段主要是利用空气进行吹脱, 空气由离心风机 1 经流量计 2 计量后由进气口进入逆流旋转填料床 3, 沿径向通过填料层; 含硝基苯废水经液泵 15 送入旋转填料床 3 中心, 经液体分布器喷洒在填料内部后沿径向甩出, 在填料层中与空气逆流接触完成吹脱过程。吹脱后的气体由活性炭吸收装置 4 回收硝基苯, 废水进入储液槽 12 进入氧化降解阶段。

超重力- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 高级氧化法处理阶段, 氧气 7 经臭氧发生器 8 后产生 O_3/O_2 混合气体进入旋转填料床 5 底部, 沿轴向向上通过填料层; 吹脱后的废水在储液槽 12 中添加一定量 H_2O_2 后经液泵 11 送入旋

转填料床 5 中心, 经液体分布器喷洒在填料内部后沿径向甩出, 在填料层中与臭氧气体错流接触完成臭氧吸收和氧化降解过程。反应后气体由尾气装置 6 处理后排空。

2.4 分析方法

废水的处理效果以硝基苯去除率来表示, 浓度采用高效液相色谱仪测定, 检测波长 262 nm, C18 反相柱 (250 mm \times 4.6 mm \times 5 μm), 流动相: 甲醇-水 (70:30), 流速: $0.9 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 柱温 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 进样量 $20 \mu\text{L}$ 。硝基苯去除率 (η) 的计算公式为:

$$\eta = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_0 和 C_1 分别为处理前后的硝基苯浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

COD_{Cr} 测定: 采用 GB/T 11914-1989 中重铬酸钾法测定; 气相臭氧浓度的检测采用 GT901 泵吸式臭氧检测仪测定, 利用 CJ/T 3028.2-1994 中碘量法标定。

3 结果与讨论

3.1 超重力-吹脱法预处理含高浓度硝基苯废水

实验中以硝基苯吹脱率为实验结果, 考察超重力因子、气体流量、液体流量、吹脱次数等因素对硝基苯单次吹脱率的影响。

3.1.1 超重力因子对硝基苯吹脱率的影响

控制废水中硝基苯的初始浓度 $551.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 液体流量为 $20 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 气体流量为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 考察不同超重力因子 (β) 对硝基苯吹脱率的影响。结果如图 2 所示。

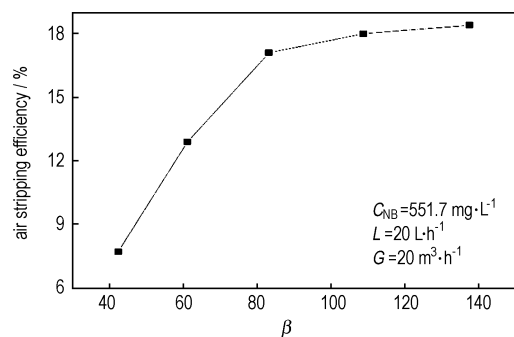


图 2 超重力因子对硝基苯吹脱率的影响

Fig. 2 Effect of high gravity factor (β) on air stripping efficiency of nitrobenzene

从图 2 可以看出, 随着超重力因子的增大, 硝基苯吹脱率呈现出先升高后趋于平缓的趋势。这是因为超

重力因子增大后,填料内液膜和液滴所受的离心力增大,从而导致液膜表面流速以及脱离丝网填料的液滴运动速度加快,气液相界面更新速率加快;另外,受到填料的剪切分散作用增强,丝网填料表面的液膜变薄,填料间隙中的液滴和外腔内的液滴平均直径减小,比相表面积增大^[20],硝基苯吹脱率逐渐升高。当超重力因子超过 80 时,硝基苯吹脱率增加变缓,此时继续增大超重力因子需要电机增大功率提高更大转速,从而能耗增大,不经济合理。因此优化所得超重力因子大小为 80。

3.1.2 气体流量对硝基苯吹脱率的影响

控制废水中硝基苯的初始浓度为 551.7 mg·L⁻¹,液体流量为 20 L·h⁻¹,超重力因子为 80,考察不同气体流量(G)下硝基苯的吹脱率,结果如图 3 所示。

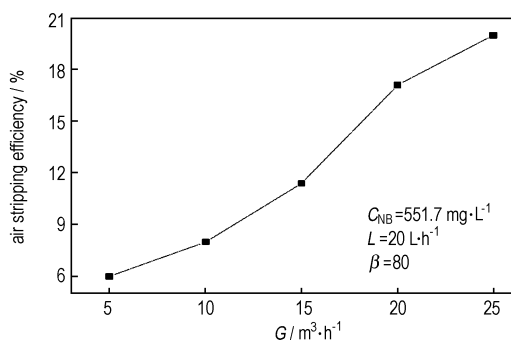


图 3 气体流量对硝基苯吹脱率的影响

Fig. 3 Effect of gas flow rate (G) on air stripping efficiency of nitrobenzene

从图 3 可以看出,在液体流量及其他条件固定不变时,该工艺中随着气体流量的增加,废水中硝基苯的吹脱率也增大。因为气流量的增大使得气液间相互曳力作用增强,使一部分液膜被冲击后形成半径更小的液滴、雾滴,这些液滴、雾滴的出现有利于增大气液接触面积,强化传质过程,加快硝基苯从液相进入气相的传质速率^[21]。根据亨利定律^[22]可知,加快气相的更新速率有助于吹脱过程的进行。但通过实验研究发现,当气体流量大于 20 m³·h⁻¹后,会出现液泛现象。所以综合实验条件选取适宜气量为 20 m³·h⁻¹。

3.1.3 液体流量对硝基苯吹脱率的影响

控制废水中硝基苯的初始浓度为 551.7 mg·L⁻¹,气体流量为 20 m³·h⁻¹,超重力因子为 80,考察不同液体流量(L)下硝基苯的吹脱率,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,在气体流量及其他条件固定不变时,随着液体流量的增加,废水中硝基苯的吹脱率呈现先不变后下降的趋势。当液体流量大于 20 L·h⁻¹

时硝基苯吹脱率呈现出下降趋势。这是因为随着液体流量的增加,填料润湿程度升高,液体流量为 20 L·h⁻¹时,可使填料充分润湿。当液体流量过大时,液体径向通过填料层的时间变短,使得气液接触时间变短,同时填料对液体的剪切分散作用减弱^[23],不利于硝基苯传质过程的进行。综合考虑,在处理量越大越好的前提下,选择较适宜的液体流量为 20 L·h⁻¹。

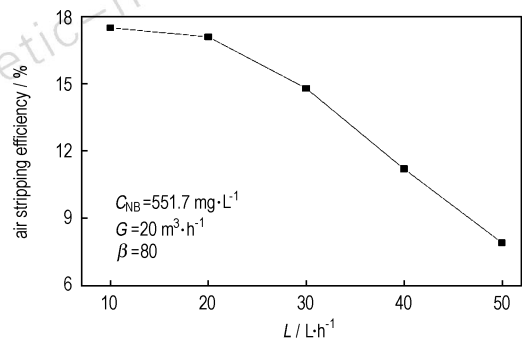


图 4 液体流量对硝基苯吹脱率的影响

Fig. 4 Effect of liquid flow rate (L) on air stripping efficiency of nitrobenzene

3.1.4 吹脱次数与硝基苯浓度的关系

在上述适宜操作条件 $\beta=80$, $L=20$ L·h⁻¹, $G=20$ m³·h⁻¹下,考察吹脱次数与废水中硝基苯浓度的关系,同时与填料床(Packed Bed, PB)即超重力因子为 0 时对比,结果如图 5 所示。

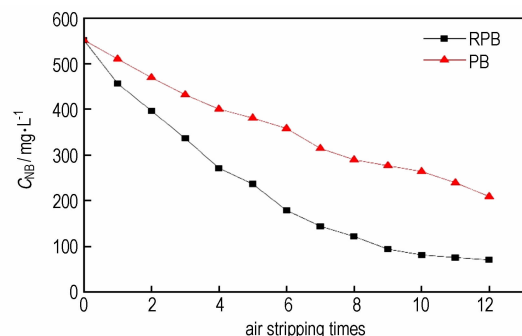


图 5 吹脱次数与废水中硝基苯浓度的关系

Fig. 5 Relation of air stripping times and concentration of nitrobenzene in wastewater

从图 5 中可以看出,随着吹脱次数的增加硝基苯含量逐渐降低,RPB 环境下硝基苯含量明显低于 PB 中硝基苯含量。当出脱次数为 10 次时,RPB 环境中硝基苯去除率为 85.2%,而 PB 中硝基苯去除率仅为 52.1%,说明超重力技术可有效强化空气吹脱法处理含高浓度硝基苯废水。在 RPB 反应器中,当硝基苯浓

度降低到 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时, 硝基苯浓度降低趋势减缓, 此时考虑到处理效率及能耗因素, 继续利用此方法吹脱处理意义不大。因此, 当硝基苯浓度降低到 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时利用超重力- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 高级氧化法深度处理。

3.2 超重力- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 高级氧化法深度处理

将吹脱后的实验废水进行超重力- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 高级氧化法深度处理, 此时废水中硝基苯浓度为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。根据前期实验得出的适宜操作条件^[24], 调节废水初始 pH 值为 10.5, 在超重力因子 β 为 80、气相 O_3 浓度 C_{O_3} 为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (相应的液相 O_3 浓度为 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、液体流量 L 为 $120 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、双氧水浓度 $C_{\text{H}_2\text{O}_2}$ 为 $4.9 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下对含硝基苯废水进行处理, 同时与填料床 (超重力因子 β 为 0) 对比, 结果如图 6 所示。

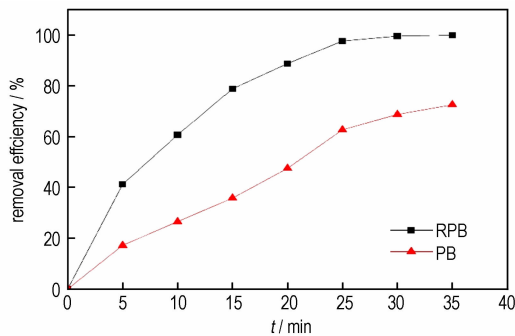


图 6 高级氧化过程硝基苯去除率随时间的变化

Fig. 6 The change in removal efficiency of nitrobenzene with time during the advanced oxidation process

从图 6 中可以看出, 在适宜的操作条件下, 硝基苯去除率随着时间的延长逐渐升高, 当处理时间为 25 min 时, RPB 环境下硝基苯去除率可达 97.7%, 比 PB 中硝基苯去除率 62.7% 高出 35%, 说明超重力技术可明显强化 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 法处理硝基苯废水。

对初始硝基苯废水, 利用超重力强化吹脱与 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 法联合处理后, 硝基苯去除率可达 99.6%, 出水可生化系数 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}=0.38$, 满足可生化标准 (GB8978-1996)。

4 结论

(1) 实验结果表明, 将超重力技术运用于吹脱过程和 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 高级氧化过程都可有效提高硝基苯去除率。

(2) 在超重力-吹脱实验部分, 硝基苯吹脱率随气

体流量增加而增大, 随液体流量增加呈先增大后减小的趋势, 随超重力因子的增大先增大后趋于不变, 得出的较佳实验条件为: $L=20 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, $G=20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $\beta=80$, 吹脱 10 次硝基苯含量为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝基苯吹脱率为 85.2%; 在超重力- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 实验部分, 调节废水初始 pH 值为 10.5, 在超重力因子 β 为 80、气相 O_3 浓度 C_{O_3} 为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、液体流量 L 为 $120 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 H_2O_2 浓度 $C_{\text{H}_2\text{O}_2}$ 为 $4.9 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下处理含硝基苯废水 25 min 后, 硝基苯去除率达 97.7%。

(3) 超重力强化吹脱与 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 法联合处理后, 硝基苯去除率达 99.6%, $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}=0.38$, 满足可生化标准。

参考文献:

- [1] 孙荣康, 瞿美林, 陆才正. 火炸药工业的污染及其防治 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
- [2] 常双君, 刘玉存. 超临界水氧化处理 TNT 炸药废水的研究 [J]. 含能材料, 2007, 15(3): 285-288.
CHANG Shuang-jun, LIU Yu-cun. Treatment of TNT wastewater by supercritical water oxidation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(3): 285-288.
- [3] Jiao W Z, Liu Y Z, Liu W L, et al. Degradation of nitrobenzene-containing wastewater with O_3 and H_2O_2 by high gravity technology [J]. *China Petroleum Processing & Petrochemical Technology*, 2013, 15(1): 85-94.
- [4] 王惠娥, 孙继林, 颜事龙, 等. 白腐真菌-泥炭净化处理 DDNP 废水 [J]. 含能材料, 2013, 21(3): 367-371.
WANG Hui-e, SUN Ji-lin, YAN Shi-long, et al. Waste-water treatment of diazodinitrophenol by white rot fungus-peat [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 367-371.
- [5] Oh B T, Seo Y S, Sudhakar D, et al. Oxidative degradation of endotoxin by advanced oxidation process ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ & UV/ H_2O_2) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 279: 105-110.
- [6] 刁金祥, 刘有智, 王贺, 等. 旋转填料床中 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 法处理 TNT 红水 [J]. 含能材料, 2007, 15(3): 281-284.
DIAO Jin-xiang, LIU You-zhi, WANG He, et al. $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ oxidative treatment of TNT red-water in a rotating paced bed [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(3): 281-284.
- [7] 吴耀国, 焦剑, 赵大为, 等. 炸药废水处理的高级氧化技术 [J]. 含能材料, 2003, 11(3): 166-169.
WU Yao-guo, JIAO Jian, ZHAO Da-wei, et al. Advance oxidation process for treatment of waste water contaminated by explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(3): 166-169.
- [8] De Torres-Socías E, Fernández-Calderero I, Oller I, et al. Cork boiling wastewater treatment at pilot plant scale: Comparison of solar photo-Fenton and ozone (O_3 , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$). Toxicity and biodegradability assessment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 234: 232-239.
- [9] 薛翠芳, 刘有智, 焦纬洲. 超重力气提法处理丙烯腈废水 [J]. 化工进展, 2014, (9): 2501-2505.
XUE Cui-fang, LIU You-zhi, JIAO Wei-zhou. Experimental study

- on treatment of acrylonitrile waste water by high gravity air stripping technology [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, (9): 2501–2505.
- [10] Quan X J, Cheng Z L, Xu F, et al. Structural optimization of the porous section in a water-sparged aerocyclone reactor to enhance the air-stripping efficiency of ammonia [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, 2(2): 1199–1206.
- [11] Ghoreyshi A A, Sadeghifard H, Entezarian F. Efficiency assessment of air stripping packed towers for removal of VOCs (volatile organic compounds) from industrial and drinking waters [J]. *Energy*, 2014, 73: 838–843.
- [12] Zeng Z Q, Zou H K, Li X, et al. Degradation of phenol by ozone in the presence of Fenton reagent in a rotating packed bed [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 229: 404–411.
- [13] Zeng Z Q, Zou H K, Li X, et al. Ozonation of phenol with O₃/Fe(II) in acidic environment in a rotating packed bed [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(31): 10509–10516.
- [14] 向阳, 刘良, 初广文, 等. 超重力旋转填充床氧解吸过程的数值模拟 [J]. *化工学报*, 2014, 65(7): 2785–2792.
XIANG Yang, LIU Liang, CHU Guang-wen, et al. Numerical simulation for water deoxygenation in rotating packed bed [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(7): 2785–2792.
- [15] Shivhare M K, Rao D P, Kaistha N. Mass transfer studies on split-packing and single-block packing rotating packed beds [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2013, 71: 115–124.
- [16] Jiao W Z, Li J, Liu Y Z, et al. Dispersion performance of methanol-diesel emulsified fuel prepared by high gravity technology [J]. *China Petroleum Processing & Petrochemical Technology*, 2014, 16(1): 27–34.
- [17] Rajan S, Kumar M, Ansari M J, et al. Limiting gas liquid flows and mass transfer in a novel rotating packed bed (HiGee) [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(2): 986–997.
- [18] 潘朝群, 邓先和. 错流型超重力旋转填料床中液滴的运动模型 [J]. *化工学报*, 2003, 54(7): 918–922.
PAN Chao-qun, DENG Xian-he. Motion model of droplet in cross-rotating packed bed [J]. *CIESC Journal*, 2003, 54(7): 918–922.
- [19] Jiao W Z, Liu Y Z, Shao F, et al. Degradation of wastewater containing nitrobenzene by High gravity-ultrasonic/ozonation/electrolysis technology [J]. *China Petroleum Processing & Petrochemical Technology*, 2012, 14(3): 96–101.
- [20] Yan Z Y, Lin C, Ruan Q. Dynamics of droplets and mass transfer in a rotating packed bed [J]. *Aiche Journal*, 2014, 60(7): 2705–2723.
- [21] Guo K, Zhang Z Z, Luo H J, et al. An innovative approach of the effective mass transfer area in the rotating packed bed [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(10): 4052–4058.
- [22] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南, 等. 化工原理(第二版)(下) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 5–7.
- [23] Li Y M, Ji J B, Yu Y L, et al. Hydrodynamic behavior in a rotating zigzag bed [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, 18(1): 34–38.
- [24] 郭亮, 焦伟洲, 刘有智, 等. 不同臭氧组合工艺处理含硝基苯类化合物废水的实验研究 [J]. *含能材料*, 2014, 22(5): 702–708.
GUO Liang, JIAO Wei-zhou, LIU You-zhi, et al. Treatment of nitrobenzene-containing wastewater using different combined processes with ozone [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 702–708.

Combined Treatment of Air Stripping-O₃ and H₂O₂ Oxidation for High Concentration Nitrobenzene-containing Wastewater Enhanced by High Gravity Technology

FENG Zhi-rong^{1,2}, JIAO Wei-zhou^{1,2}, LIU You-zhi^{1,2}, GUO Liang^{1,2}, XU Cheng-cheng^{1,2}, YU Li-sheng^{1,2}, WANG Yong-hong^{1,2}

(1. Research Center of Shanxi Province for High Gravity Chemical Engineering and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi Province Key Laboratory of Hige-oriented Chemical Engineering, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To reduce the content of nitrobenzene in wastewater, an air stripping-O₃/H₂O₂ oxidation treatment process enhanced by high gravity technology was established for the first time. The pretreatment of high concentration nitrobenzene-containing wastewater was conducted by air stripping method, which was enhanced by high gravity technology. The effects of high gravity factor β , gas-flow rate G , liquid-flow rate L and stripping times on the nitrobenzene stripping efficiency were investigated. The experimental results show that the combination of high gravity technology can effectively improve the nitrobenzene removal rate. When the $G=20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $L=20 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, $\beta=80$, the concentration of nitrobenzene after stripping for 10 times is decreased to $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Then the changes of stripping efficiency are significantly weakened. The lower content wastewater is further treated by advanced oxidation process of O₃/H₂O₂ enhanced by high gravity technology. When $L=120 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, $\beta=80$, gas phase O₃ concentration $C_{\text{O}_3}=50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the concentration of H₂O₂ $C_{\text{H}_2\text{O}_2}=4.9 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, initial pH=10.5 and the processing time is 25 min, the removal efficiency of nitrobenzene can reach 99.6% and BOD₅/COD_{Cr}=0.38; the wastewater treated can meet the standard of biochemistry treatment of integrated wastewater discharge standard (GB8978–1996).

Key words: high gravity; process intensification; air stripping; nitrobenzene; ozone; peroxide of hydrogen

CLC number: TJ55; X113

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.016