

刘韵达, 胡勇有, 何向明, 等. 2008. 饮用水源突发挥发酚污染应急处理中试研究[J]. 环境科学学报, 28(12): 2503 - 2508

Liu Y D, Hu Y Y, He X M, et al. 2008. Pilot study on emergent treatments of raw water suddenly polluted by phenols[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(12): 2503 - 2508

## 饮用水源突发挥发酚污染应急处理中试研究

刘韵达<sup>1</sup>, 胡勇有<sup>1,\*</sup>, 何向明<sup>2</sup>, 程建华<sup>1</sup>, 章民驹<sup>2</sup>, 胡军有<sup>1</sup>, 康宇炜<sup>2</sup>

1. 华南理工大学 环境科学与工程学院, 广州 510006

2. 南海发展股份有限公司, 佛山 528200

收稿日期: 2008-04-08

录用日期: 2008-09-03

**摘要:** 通过为期 2 个月规模为  $4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  的中试试验, 考察了常规给水工艺(混凝、沉淀和过滤)对突发挥发酚污染原水的处理情况, 重点考察了活性炭吸附、臭氧预氧化和高锰酸钾预氧化等 3 种应急工艺的除酚效能. 结果表明, 常规混凝沉淀对挥发酚的去除率低于 10%, 砂滤在 12h 内可起到拦截挥发酚的作用. 3 种应急工艺均可提高挥发酚的去除效果, 起到应急的作用. 其中活性炭吸附对挥发酚的去除率可达 44%; 在  $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的投量下高锰酸钾预氧化可达到 50% 的除酚效率; 臭氧预氧化可使沉淀出水挥发酚达标 ( $0.002\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 挥发酚去除率约 99%.

**关键词:** 饮用水源; 挥发酚; 粉末活性炭; 臭氧; 高锰酸钾; 应急处理

文章编号: 0253-2468(2008)12-2503-06

中图分类号: X507

文献标识码: A

## Pilot study on emergent treatments of raw water suddenly polluted by phenols

LIU Yunda<sup>1</sup>, HU Yongyou<sup>1,\*</sup>, HE Xiangming<sup>2</sup>, CHENG Jianhua<sup>1</sup>, ZHANG Minju<sup>2</sup>, HU Junyou<sup>1</sup>, KANG Yuwei<sup>2</sup>

1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006

2. Nanhai Development Company Limited, Foshan 528200

Received 8 April 2008;

accepted 3 September 2008

**Abstract:** The removal of phenol after normal water treatment processes (coagulation, precipitation and filtration) and emergent treatment processes such as adsorption by activated carbon were compared in a 2 month pilot study treating  $4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  of raw wastewater. Pre-oxidation by ozone and potassium permanganate were employed when phenol pollution occurred suddenly in the raw water. The pilot results show that the removal efficiency of phenol treated by normal coagulation and precipitation was less than 10%. Sand filtration could prevent contamination for 12 hours. Three emergent treatment processes enhanced the removal of phenol. The removal efficiency of phenol adsorbed by activated carbon was up to 44% while 50% was removed by pre-oxidation with potassium permanganate ( $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). The precipitated effluent reached the accepted standard ( $0.002\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) after a pre-ozonation process in which the removal efficiency of phenol was nearly 90%.

**Keywords:** drinking water; phenol; powder activated carbon; ozone; potassium permanganate; emergent treatment

### 1 引言 (Introduction)

近年来, 城市水源地突发性污染事件频发, 对社会经济造成巨大的损失. 以苯酚为代表的挥发酚类化合物, 是一类高毒性物质, 存在于很多种化工企业的生产废水中, 受污水体中检出率和超标率很高.

粉末活性炭吸附是应用最广泛的除酚方法, 在  $40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  的含酚纯水中投加  $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的粉末活

炭, 可将酚降低到  $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  以下 (马军等, 1994). 活性炭投加点的选择对有机物微污染的去除十分关键 (王建平等, 2006; 张小满等, 1998). 对突发有机物污染研究也一致认为投加点设置在吸水井最为有效 (陈忠林, 2006; 傅金祥等, 2007; 陈蓓蓓等, 2007). 采用氧化法除酚, 在中性条件下, 投加  $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的高锰酸钾可使含苯酚  $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  纯水降低至  $4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 且确定高锰酸钾最佳投量最为重要 (张锦等, 2000). 在  $\text{pH} = 8.0 \sim 9.0$ , 高铁酸盐和

基金项目: 广东省经贸委技术创新项目 (粤经贸创新质量 [2006] 428 号)

Supported by the Guangdong Economic and Trade Commission Creative Technology Program (No. [2006] 428)

作者简介: 刘韵达 (1982—), 男, E-mail: reylas@163.com, Tel: (020) 39383786; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: ppyyhu@scut.edu.cn

Biography: LIU Yunda (1982—), male, E-mail: reylas@163.com, Tel: (020) 39383786; \* Corresponding author, E-mail: ppyyhu@scut.edu.cn

苯酚的质量比为 20:1,搅拌 10min,苯酚去除率可达 94.4% (姜洪泉等,2003). 虽然在不同 pH 条件下苯酚氧化的机制不同,但 pH 值对苯酚的去除率却影响不大 (钟理,2002). 然而,这些研究主要针对  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  级的含酚微污染源水除酚,其研究结果并不能直接用于以瞬间高浓度的饮用水源突发挥发酚污染的应急处理.

为此,本研究以北江水为实验原水,展开粉末活性炭吸附、臭氧预氧化及高锰酸钾预氧化等 3 种应急工艺处理模拟突发性挥发酚污染原水中试. 考察了以混凝、沉淀和过滤为主的常规水处理工艺和

3 种应急处理工艺对酚的去除效果;探明了活性炭投加量、投加方式对除酚的影响并确定了其应急处理能力;探明了臭氧和高锰酸钾投加量对除酚的影响,给出了技术经济评价. 本研究结果可作为突发性原水挥发酚污染事故的应急处理的技术储备及借鉴.

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 实验原水

实验原水取自北江,实验期间原水水质见表 1.

表 1 原水水质  
Table 1 Raw water quality

水质指标	浊度 /NTU	pH	氨氮 /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	亚硝酸盐 /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	耗氧量 /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
波动范围	7~54	7.56~8.20	0.09~1.64	0.032~0.227	1.42~3.21
均值	20.20	7.84	0.30	0.106	1.90

2.2 试剂、仪器与分析方法

试剂:苯酚,分析纯;聚合氯化铝 (PAC),液体,含铝 6%~7%;木质粉末活性炭,200 目;高锰酸钾,工业品.

仪器:威固 VG03-30 臭氧发生器;UV2550 紫外可见分光光度计.

4-氨基安替比林氯仿萃取分光光度法测挥发酚. 碘量法测臭氧发生器产生的臭氧.

2.3 中试试验方法

2.3.1 中试装置 中试装置由常规混凝处理单元 (混合反应、斜管沉淀、砂滤)、污染物配水单元以及应急加药单元构成,设计处理水量为  $4\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . 吸附池停留时间 45min;氧化池氧化时间 15min;滤池滤料为河砂,厚 2m,过滤周期为 24h. 装置流程如图 1 所示.

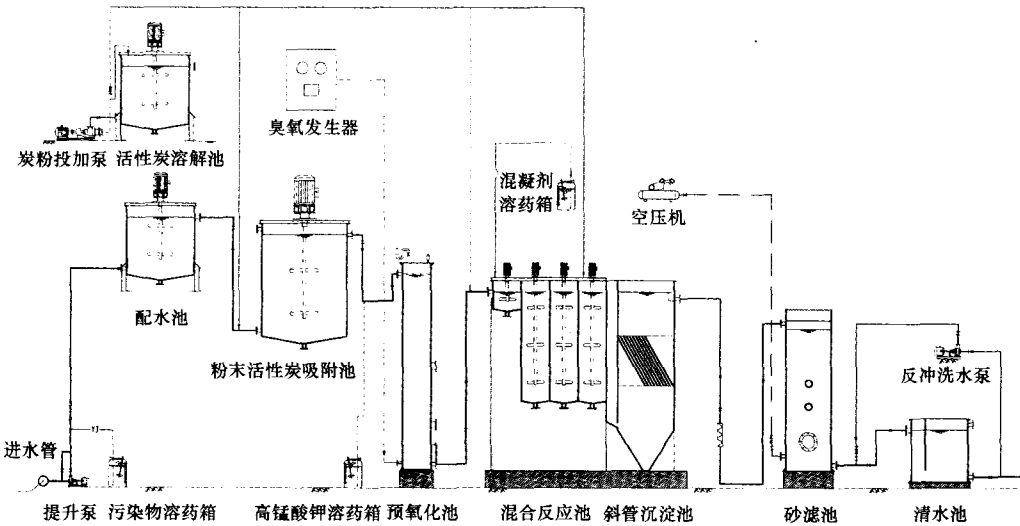


图 1 应急处理中试工艺流程图  
Fig. 1 Flow chart of the emergent treatment pilot-scale process

2.3.2 中试方案 苯酚在配水池投加,聚合氯化铝(PAC)在快速混合池投加.先将粉末活性炭搅拌成炭浆,分别投加到吸附池、反应池前和反应池中.臭氧和高锰酸钾在预氧化池投加,臭氧采用水射式投加.在设定工艺参数下稳定运行 0.5h 后开始计时,间隔 4h 取样 1 次.

2.4 数据处理方法

取 4 次取样的测试数据的平均值并分析误差.

3 结果 (Results)

3.1 突发挥发酚污染特征分析

挥发酚类化合物种类繁多,有苯酚、甲酚、氨基酚、硝基酚、萘酚、氯酚等,而以苯酚、甲酚污染最突出.在原水中加入苯酚模拟不同污染倍数的挥发酚污染原水,观测其浊度、COD、色、味、感官来确定突发挥发酚污染的特征,结果如表 2 所示.50~200 倍挥发酚污染,各项指标较原水无明显变化,200 倍以上挥发酚污染时,有轻微的臭味.对 200 倍挥发酚污染原水,在  $100\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  下搅拌 3h 后,挥发酚浓度仅减少了  $0.002\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .因此,突发挥发酚污染的特征是:轻微臭味,色度、浊度、COD 几乎无变化,感官上无明显特征,在水中存留时间长.本研究确定以 100 倍(苯酚浓度  $0.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的挥发酚污染原水进行中试.

表 2 不同倍数挥发酚污染特征

Table 2 Pollution characteristics at different phenol concentrations

污染倍数	浊度	COD/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	色度	臭强度 等级	感官 质量
0	20.8	5.1	25	0	一般
50	20.8	6.1	25	0	一般
100	20.7	3.2	25	0	一般
200	20.8	5.7	25	1	一般
400	20.6	5.5	25	1	一般

注:GB5749-2006 规定值苯酚限值  $0.002\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

3.2 混凝沉淀应急除酚效果

加大混凝剂投加量的强化混凝是除浊除有机物的有效手段,也是一种有效的应急处理方法.在水厂 PAC 投加量  $18\sim25\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (以液体商品计)基础上加大投药量,处理模拟含酚原水,结果如图 2 所示.在原水苯酚超标约 100 倍时,常规混凝沉淀处理(PAC  $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )沉淀出水苯酚的去除率仅 8.1%.PAC 投加量增至  $30\sim50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,沉淀出水苯酚去除率仍低于 10%.因此,可认为强化混凝对应急除酚几乎无效果,后续试验 PAC 投加量均为  $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

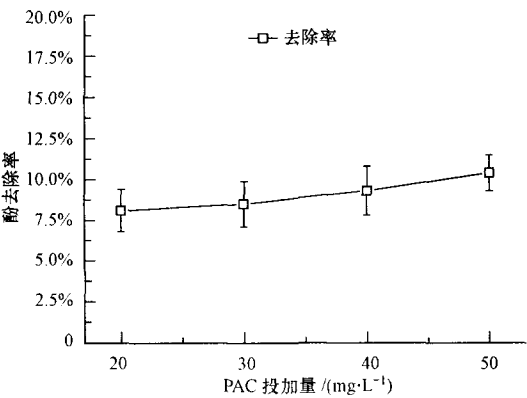


图 2 常规混凝的除酚效果

Fig. 2 Removal of Phenol by coagulant treatment

3.3 砂滤应急除酚效果

含酚原水经混凝沉淀后进入滤池,检测滤后水苯酚浓度,结果如图 3 所示.12h 以内,滤后水苯酚浓度均低于检测限,12h 以后,滤后水中苯酚浓度迅速增加,24h 后,苯酚浓度达到  $0.156\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,超标严重.因此,当突发挥发酚污染时,缩短滤池的过滤周期,是一种快速简单的应急处理方法,可视原水受污程度和水厂实际情况确定过滤周期,一般可取正常情况下过滤周期的 1/2.

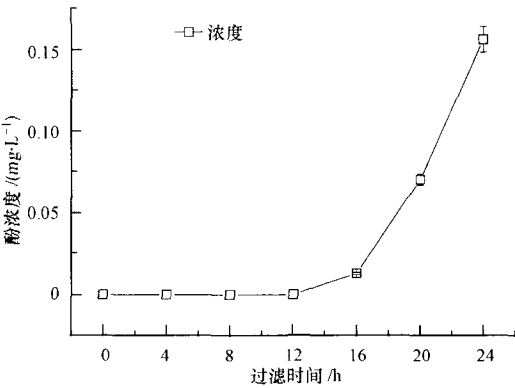


图 3 出水苯酚浓度随过滤时间的变化

Fig. 3 Phenol concentration vs sand filtration time

3.4 粉末活性炭吸附应急除酚效果

3.4.1 粉末活性炭投加量对应急除酚的影响 活性炭在吸附池前管道投加,不同投加量对苯酚的去除效果如图 4 所示.随活性炭投加量增大,苯酚的去除率也相应增加,投加量  $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  较  $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的苯酚去除率增加约 12%;但继续增大活性炭投量,去除率增加减缓,总去除率在 20.5%~44% 之间.活性炭吸附量随投加量的加大而有所减少,吸附量在  $2.2\sim4.1\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$  之间.

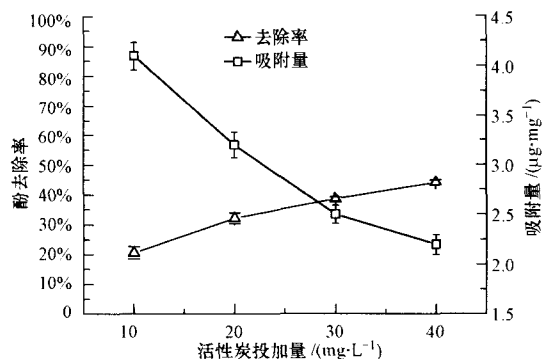


图4 不同活性炭投加量的除酚效果

Fig. 4 Removal of phenol by different dosages of activated carbon

3.4.2 粉末活性炭投加点对应急除酚的影响 在吸附池前投加、反应池前投加及反应池中投加的除酚效果如表3所示. 单点投加  $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  活性炭时, 吸附池前投加除酚效率最高 (33.8%), 比反应池前投加高 5.2%, 反应池中投加去除率最低 (22.3%). 活性炭的接触时间是影响除酚效果的重要因素, 在吸附池投加可延长吸附时间约 45min, 而反应池前和反应池中投加的吸附时间仅为 21min 和 7min. 多点投加的除酚效率仅约 20%, 低于单点投加. 因此, 活性炭投加点应尽量设在源水进厂的前端保证 45min 的吸附时间为适宜.

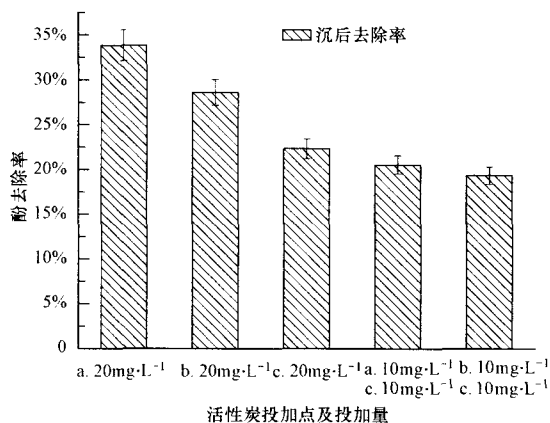


图5 不同投加点的除酚效果 (a. 吸附池前投加, b. 反应池前投加, c. 反应池中投加 (絮体形成时))

Fig. 5 Removal of phenol by different addition positions

3.4.3 粉末活性炭对挥发酚的应急处理能力 于吸附池前投加  $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  活性炭, 处理不同浓度倍数苯酚污染原水, 结果如图6所示. 当原水苯酚高于 15 倍时, 沉淀后水苯酚浓度低于  $0.04\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 当原水苯酚 15 倍时, 沉淀后水未检出苯酚. 可见, 原水苯酚污染倍数越低, 沉淀后水苯酚浓度可越低. 采用

粉末活性炭吸附应急处理突发挥发酚污染原水, 可使 15 倍苯酚污染原水沉淀后达标, 不会给滤池带来负荷, 滤后水有保障.

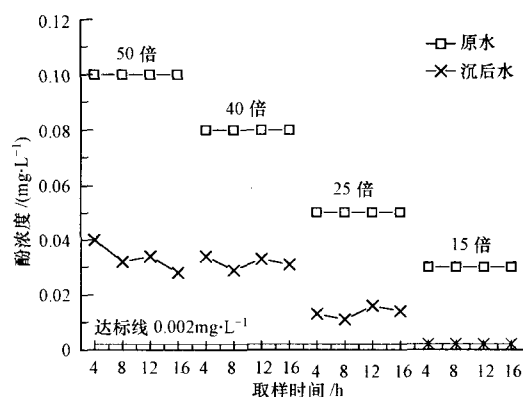
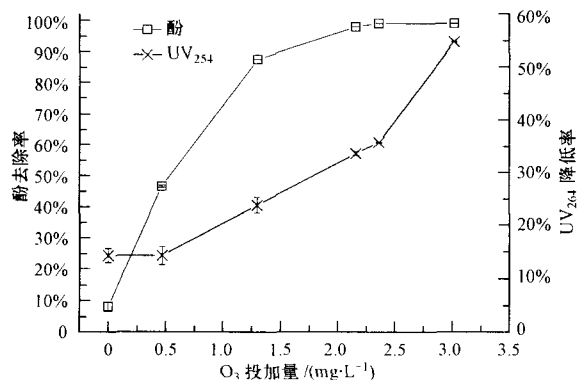


图6 活性炭吸附不同初始酚浓度原水的去除效果

Fig. 6 Removal of phenols at different initial concentrations by activated carbon adsorption

### 3.5 预氧化应急除酚

3.5.1 臭氧预氧化应急除酚 在预氧化池投加不同量的臭氧, 检测沉淀后水中苯酚的浓度, 结果如图7所示. 随臭氧投加量的增加, 苯酚去除率显著增加, 当  $\text{O}_3$  投加量达  $2.16\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 苯酚去除率达到 98%, 沉淀出水中已检不出苯酚. 臭氧氧化酚类的中间产物有芳核水解物, 如二酚、醌等, 均是具有紫外消光性的有毒物质, 而终点产物如乙醛酸、草酸和乙二醛等, 一般不具有紫外消光性, 同时检测沉后水的  $\text{UV}_{254}$  (图7) 发现  $\text{UV}_{254}$  去除率随臭氧投加量的增加而增加, 当投加量增加至  $3.02\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 虽然苯酚去除率已无变化, 但  $\text{UV}_{254}$  降低率仍然继续增加, 说明水中仍然存在可被臭氧氧化的紫外消光性物质. 因此, 应急除酚的臭氧投加量不宜低于  $3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

图7 臭氧投加量对除酚除  $\text{UV}_{254}$  的影响Fig. 7 Influence of ozone dose on phenols and  $\text{UV}_{254}$  removal

3.5.2 高锰酸钾预氧化应急除酚 高锰酸钾经计量泵投加到预氧化池,检测沉后水中的苯酚,结果如图 8 所示.高锰酸钾投量增加,苯酚去除率也相应增加,投加  $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  较未投加时除酚效率提高了

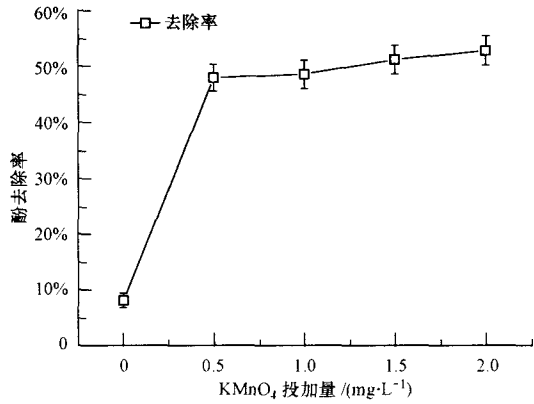


图 8 高锰酸钾投加量对除酚的影响  
Fig.8 Influence of Potassium Permanganate dosage on phenols removal

39.8%,效果显著.而投加量由  $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增至  $2.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,苯酚的去除率由 47.9% 增至 52.7%,去除率提高了仅 4.8%.可见投加少量的高锰酸钾即可起到较好的苯酚去除效果,且投加量太大( $>1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )时沉淀后水呈红色,有造成滤后水锰超标的风险.因此,投加  $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的高锰酸钾可在受污程度较轻时起到很好的应急处理效果.

3.6 应急除酚工艺的技术经济评价

通过本次中试,可总结出活性炭吸附、臭氧及高锰酸钾氧化应急除酚工艺的特点:①快速高效.②将污染安全屏障前移,安全性高.活性炭可将污染控制在进厂前,臭氧和高锰酸钾可将污染控制在滤前,确保滤后水的安全.③设备简单.增加一套投加设施即可实现应急处理.③成本较低.相对于新增庞大的处理构筑物等等措施,应急处理的成本在一次性投资上和运行费用上均较低.

表 3 是 3 种应急除酚工艺的成本估算.以活性炭吸附成本最高,高锰酸钾预氧化成本最低.

表 3 应急处理成本  
Table 3 Costs of the emergent treatments

应急工艺	吨水用量/( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )	药剂单价/( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	吨水费用/( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	备注
活性炭吸附	0.02	5000	0.1	市场均价
臭氧预氧化	0.003	34640	0.104	0.8 元/kWh
高锰酸钾预氧化	0.0005	11000	0.0055	市场均价

4 讨论 (Discussion)

酚类分子量小,亲水性强,在混凝沉淀过程中主要去除途径是矾花表面的物理化学吸附,因此图 2 中苯酚去除效果甚微.砂滤除酚是颗粒表面吸附与微生物吸附、降解的综合作用,其中最主要的是颗粒表面吸附(谢水波等,2000),因此过滤时间是重要因素,图 3 中,12h 内对苯酚能起到截留作用,随着过滤时间的延长至吸附达到饱和而穿透滤池.

粉末活性炭的投加量和投加点在实际应用中是至关重要的因素.活性炭的投加点关系到接触时间、吸附竞争、颗粒包裹及混凝等方面,当投加点在絮凝池中絮体刚刚形成的位置既可避免竞争吸附,又可使絮体对粉末活性炭颗粒的包裹作用最小;另一方面吸水并投加可大大延长活性炭的接触时间(王建平等,2006;张小满等,1998).在应急处理突发污染方面,投加点应尽量设置在水厂前端,如在吸水并投加.本中试研究结果也验证了这一点,于前端投加活性炭的除酚效率最高;而多点投

加由于絮体对粉末活性炭分散颗粒的网捕、包裹、屏蔽作用,实际处理效果不好.活性炭投加量对除酚效率的影响很大,由于在吸水并投加,水源水份复杂,其他有机物的竞争吸附也会影响活性炭的除酚效率,因此,实际应用中应根据原水中酚的浓度以及有机物的含量来调整活性炭投加量,一般的应急除酚的投加量约为  $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .图 4 中普通木质活性炭对酚的吸附容量仅为  $2.2\sim4.1\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ ,这可能因为微孔是活性炭吸附小分子有机物的主要部位,中孔是小分子进入微孔的主要通道,活性炭的孔隙特征影响其吸附容量.因而,进一步筛选活性炭的工作也将是有意义的.

由图 8 可知少量高锰酸钾就有很好的应急除酚效果,这与高锰酸钾除微量酚和除有机物的结果较为一致.增加投加量可提高除酚效果,但是对出水的色度影响很大.因此投加量应预先试验而定,以沉后水临界显色投加量为上限.控制一定臭氧投加量可使出水检不出酚来,但是紫外消光值并未降至最低,因为臭氧氧化酚经历了一个毒性先增加然后

降低的过程,投加量和接触时间是氧化完全与否的重要影响因素(徐新华等,2003),从图 7 可知,在接触时间 15min,增大臭氧投加量至  $3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 可以降低出水中紫外消光性有毒副产物,但尚不能判断是否氧化完全.因此,化学氧化应急除酚的安全性评价,氧化产物等还有待开展深入研究.

活性炭吸附、臭氧氧化和高锰酸钾氧化 3 种应急除酚工艺中,活性炭因其安全性高,可以作为基本应急工艺.高锰酸钾预氧化费用低,容易普及.臭氧预氧化处理能力强,特别适应于突发污染浓度不确定的情况.表 4 列出了 3 种应急除酚工艺的优劣对比.

表 4 三种应急除酚工艺对比

Table 4 Comparison of 3 emergent treatments for phenol

	运行费用	设备费用	处理能力	安全性
活性炭	高	中	一般	高
臭氧	高	高	强	未明
高锰酸钾	低	低	有限	未明

### 3 结论(Conclusions)

1) 突发挥发酚在 100 倍于国家规定限值污染浓度时,污染原水 COD、色度、浊度均无明显变化,仅在高浓度时有轻微嗅味,并且在水中的存留时间长.

2) 常规给水处理中混凝沉淀除酚效率低于 10%,增加 PAC 投加量强化混凝对应急除酚无效果.砂滤对酚有一定的截留作用,缩短过滤时间 12h 以下可起到临时应急的效果.

3) 粉末活性炭吸附的应急除酚效率为 20.5%~44%,投加量可根据原水情况调整,一般情况吸附池前投加  $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  为宜.可使 15 倍于国家规定限值的酚污染原水沉淀后达标.

4) 臭氧预氧化应急除酚的最佳投加量为  $3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,可使 100 倍于国家规定限值的酚污染原水沉淀后达标.

5) 高锰酸钾应急除酚的最佳投加量为  $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率可接近 50%.

#### References:

Chen B B, Gao N Y, Liu C, *et al.* 2007. Study on removal of atrazine in source water by powdered activated carbon at burst Pollution accident[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 33(7):9—13 (in Chinese)

Chen Z L, Ma J, Li G B, *et al.* 2006. Emergency treatment of Songhua

river raw water polluted by nitrobenzene[J]. *China Water & Wastewater*, 22(13):1—5 (in Chinese)

- Fu J X, Wang F, Li J B, *et al.* 2007. Powdered activated carbon adsorption for emergency treatment of aniline contamination[J]. *Environment Pollution & Control*, 29(8):689—694 (in Chinese)
- Jiang H Q, Yu X J, Wang P, *et al.* 2003. Phenol degrade mechanism in water by Ferrate(VI) oxidation[J]. *China Water & Wastewater*, 19(13):47—48 (in Chinese)
- Ma J, Li G B, Wang F Z. 1994. Micro-phenols in drinking water removal by powder activated carbon[J]. *China Water & Wastewater*, 10(2):22—25 (in Chinese)
- Wang J P, Huang C J. 2006. Application of powder activated carbon adsorption technology to drinking water treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 22(10):17—20 (in Chinese)
- Xie S B, Lou J S, Xiong Z W, *et al.* 2000. Research on phenol removal by quartz sand filter[J]. *China Water & Wastewater*, 16(8):8—11 (in Chinese)
- Xu X H, Zhao W R. 2003. *Water and Wastewater Ozone Treatment* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 107—110 (in Chinese)
- Zhang J, Li G B, Ma J, *et al.* 2001. Removal of micro-phenols from water by potassium permanganate composite[J]. *Journal of Harbin University of C E & Architecture*, 34(3):65—67 (in Chinese)
- Zhang X M, Cao D W, Gao T Y, *et al.* 1998. Study on optimum powder activated carbon addition position in normal water treatment[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 24(2):29—31 (in Chinese)
- Zhong L, Chen J J, Zhang H. 2002. Study on the kinetics of phenol degradation by ozone oxidation[J]. *China Water & Wastewater*, 18(9):8—11 (in Chinese)

#### 中文参考文献:

- 陈蓓蓓,高乃云,刘成,等. 2007. 粉末活性炭去除原水中阿特拉津突发污染的研究[J]. *给水排水*, 33(7):9—13
- 陈忠林,马军,李圭白,等. 2006. 受硝基苯污染松花江原水的应急处理工艺研究[J]. *中国给水排水*, 22(13):1—5
- 傅金祥,王锋,李敬宝,等. 2007. 应急处理苯胺污染水源水的粉末活性炭吸附工艺的研究[J]. *环境污染与防治*, 29(8):689—694
- 姜洪泉,于秀娟,王鹏,等. 2003. 高铁酸钾预氧化去除水中苯酚及其机理[J]. *中国给水排水*, 19(13):47—48
- 马军,李圭白,王福珍. 1994. 用粉末活性炭去除饮用水中微量酚类化合物[J]. *中国给水排水*, 10(2):22—25
- 王建平,黄长均. 2006. 粉末活性炭吸附技术在水厂的应用[J]. *中国给水排水*, 22(10):17—20
- 谢水波,娄金生,熊正为,等. 2000. 石英砂滤床除苯酚的试验研究[J]. *中国给水排水*, 16(8):8—11
- 徐新华,赵伟荣. 2003. *水与废水的臭氧处理* [M]. 北京:化学工业出版社, 107—110
- 张锦,李圭白,马军,等. 2001. 高锰酸钾复合药剂去除水中微量酚类化合物的效能研究[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 34(3):65—67
- 钟理,陈建军,张浩. 2002. 臭氧氧化降解苯酚的动力学研究[J]. *中国给水排水*, 18(9):8—11
- 张小满,曹达文,高廷耀,等. 1998. 常规水处理工艺应用粉末活性炭技术的最佳投点选择研究[J]. *给水排水*, 24(2):29—31