

赵文玉 张逢 胡洪营 等.污水再生处理臭氧氧化系统运行费用分析[J].环境科学与技术,2011,34(9):126-129. Zhao Wen-yu Zhang Feng Hu Hong-ying ,et al. Analysis of running cost and its influence factors of an ozone-oxidation system for wastewater reclaim and reuse[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(9):126-129.

# 污水再生处理臭氧氧化系统运行费用分析

赵文玉<sup>1,2</sup>, 张逢<sup>1</sup>, 胡洪营<sup>1\*</sup>, 卢如<sup>1</sup>, 陈玉芬<sup>2</sup>

(1.清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 北京 100084;

2.桂林理工大学环境科学与工程学院 广西 桂林 541004)

**摘要** :系统掌握污水再生处理臭氧氧化系统的运行费用构成及其影响因素对降低运行费用具有重要意义。文章对污水再生处理臭氧氧化系统的运行费用进行了系统分析,结果表明,其运行费用主要由臭氧发生系统运行费用和臭氧尾气破坏系统运行费用构成,其中前者比重高达95%~99%,后者约为1%~5%。影响污水再生处理臭氧氧化系统运行费用的主要因素是臭氧投加量、臭氧气体浓度等工艺参数。在保证处理效果的前提下,提高臭氧利用率,减少臭氧投加量,以及提高臭氧气体浓度,是有效降低污水处理臭氧氧化系统运行费用的关键。

**关键词** :污水再生; 臭氧氧化; 运行费用; 臭氧利用率; 臭氧气体浓度

中图分类号:X703 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2011.09.029 文章编号:1003-6504(2011)09-0126-04

## Analysis of Running Cost and Its Influence Factors of an Ozone-Oxidation System for Wastewater Reclaim and Reuse

ZHAO Wen-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, HU Hong-ying<sup>1\*</sup>, LU Ru<sup>1</sup>, CHEN Yu-fen<sup>2</sup>

(1. State Key Joint Lab of Environmental Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Environment Science and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract** : Running cost of an ozone-oxidation system relating to reclaim and reuse of wastewater was analyzed. The analysis indicated that operation cost of ozone generator, the major component of the system, accounted for around 95 to 99% of the system's running cost; while treatment of ozone tail gas just for 1~5%. On the other hand, the main factors that affect the running cost of an ozone oxidation system for reclaiming wastewater were ozone dosage and ozone gas concentration. It was concluded that with the premise of guaranteeing the quality of wastewater treatment, the measure to reduce the running cost of the ozone-oxidation system was to improve ozone utilization efficiency by means of cutting down ozone dosage and add to ozone gas concentration.

**Key words** : treatment for wastewater reclaim; ozone oxidation; running cost; ozone utilization rate; ozone gas concentration

水资源短缺引发的水危机是当今世界关注的重点课题之一,已逐步成为我国制约城市经济发展的主要因素之一<sup>[1]</sup>。污水再生利用是解决水资源短缺问题的有效途径,也是满足国家水资源可持续利用重大需求的有力保障<sup>[2-4]</sup>。运行费用是水处理工艺的一项重要考察指标之一,必将在水处理工程项目招标中占有重要的比重。特别是国家在实施节能减排的发展战略中,降低运行费用将是所有水处理工艺的发展目标。臭氧氧化工艺具有氧化能力强、处理效果好、副产物

少等优点,但存在设备昂贵、运行费用较高,虽然在饮用水处理工艺得到广泛应用<sup>[5-6]</sup>,但在污水处理工艺中尚未推广。全面分析污水再生处理臭氧氧化系统运行费用的构成、影响因素及变化规律,寻求降低运行费用的途径,就可解决臭氧氧化工艺在污水处理领域广泛应用的关键问题。

一般情况下,污水处理工艺运行费用(或称处理成本)包括处理后污水排放费、能源消耗费、药剂费、工资福利费、固定资产基本折旧费、大修理费、无形资

《环境科学与技术》编辑部(网址)http://jks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@126.com

收稿日期:2010-11-10;修回日期:2010-12-24

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2008ZX07313-002);广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻0992022-7)

作者简介:赵文玉(1973-),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为水处理理论与技术(电话)010-62797405(电子信箱)wyzhao1009@163.com;

\*通讯作者(电话)010-62794005(电子邮箱)hyhu@tsinghua.edu.cn。

产和递延资产摊销费、管理费用及其它费用、流动资金利息等 10 项<sup>[7]</sup>。

### 1 污水再生处理臭氧氧化系统运行费用构成

臭氧氧化系统运行费用 (Operation cost ,OC) 主要由臭氧发生系统运行费用、臭氧尾气破坏系统运行费用及工程折旧费组成 ,如式(1)所示 :

$$OC_T = OC_1 + OC_2 + OC_3 \tag{1}$$

式(1)中 :OC<sub>T</sub>-污水再生处理臭氧氧化系统运行费用(元) ;OC<sub>1</sub>-臭氧发生系统运行费用(元) ;OC<sub>2</sub>-臭氧尾气处理系统运行费用(元) ;OC<sub>3</sub>-其他运行费用 ,指工资福利费、固定资产基本折旧费、大修理费、无形资产和递算摊销费、管理费用及其他费用(元)。

为简化问题 ,仅就臭氧发生系统运行费用和臭氧尾气处理系统运行费用的构成、影响因素、变化规律进行讨论。

#### 1.1 臭氧发生系统运行费用

臭氧发生系统运行费用包括臭氧发生器运行费用(电耗)、冷却水运行费用(水耗)和气源运行费用(电耗)三部分组成。

$$OC_1 = OC_{11} + OC_{12} + OC_{13} \tag{2}$$

式(2)中 :OC<sub>11</sub>-臭氧发生器运行费用(元) ;OC<sub>12</sub>-冷却水运行费用(元) ;OC<sub>13</sub>-气源运行费用(元)。

##### 1.1.1 臭氧发生器运行费用

臭氧发生器本身的运行费的影响因素主要是单位臭氧电耗。A 公司生产的所有规格的臭氧发生器单位臭氧能耗相对稳定 ,平均为 9 kW·h/kg O<sub>3</sub> ,因此臭氧产量越大 ,臭氧发生器的能耗越大。而污水再生处理臭氧氧化系统所需臭氧产量由处理规模与臭氧投加量确定。

在臭氧投加量不变的情况下 ,所需的臭氧产量与处理规模成正比 ,随处理规模的增加 ,则总运行费用成正比增加 ,单位水量运行费用不变 ,即臭氧发生器单位水量运行费用与处理规模无关。

在处理规模确定的情况下 ,所需的臭氧产量与臭氧投加量成正比 ,随臭氧投加量的增加 ,总运行费用成正比增加 ,单位水量运行费用成正比增加见图 1。

##### 1.1.2 冷却水运行费用

臭氧发生器冷却水运行费用主要是产单位臭氧水耗 ,A 公司臭氧发生器单位产量臭氧水耗较稳定 ,为 3~4 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O/kg O<sub>3</sub> ,臭氧产量越大 ,所需冷却水量越大。而污水再生处理臭氧氧化系统所需臭氧产量由处理规模与臭氧投加量确定 ,同理 ,冷却水单位水量运行费用与处理规模无关 ,只与臭氧投加量有关 ,臭氧投加量越大 ,所需臭氧产量越大 ,耗用的冷却水越多 ,则总运

行费用越大 ,单位水量冷却水运行费越大见图 2。如果采用处理后的再生水的话 ,就可节约这部分运行费用。

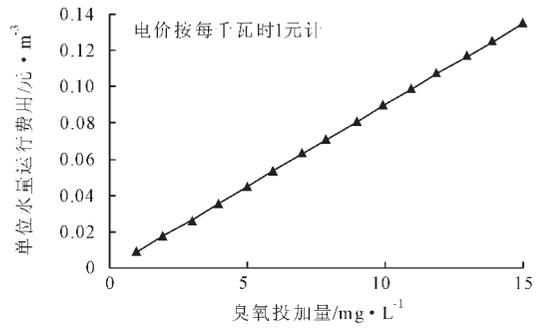


图1 A公司纯氧源臭氧发生器单位水量运行费用与臭氧投加量的关系  
Fig.1 Relation between operation cost per unit volume of wastewater and ozone dosage for an ozone generator supplied with pure oxygen gas (Company A)

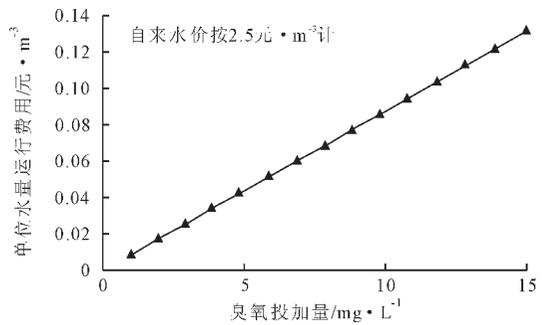


图2 A公司纯氧源臭氧发生器冷却水单位水量运行费用与臭氧投加量的关系  
Fig.2 Relation between operation cost per unit volume of wastewater of cooling water for an ozone generator supplied with pure oxygen gas (Company A)

##### 1.1.3 气源运行费用及其影响因素

气源有空气源、纯氧源两种方式 ,其中纯氧源又有液氧源和制氧机纯氧源两种来源。空气源需一套空气压缩和空气净化装置 ,制氧机纯氧源在此基础上需增加一套变压吸附制氧系统 ,液氧源是由专门的液氧站提供液氧 ,定期运送到使用现场的液氧罐。在运行费用方面 ,就这三种气源比较 ,液氧可以集中制氧 ,如果水厂离氧源近 ,比较经济 ,制氧机源比空气源运行费用稍高 ,主要是多一些沸石分子筛的补充 ,估算时可忽略 ,认为同气体流量的制氧机源与空气源运行费用相同。据国外经验 ,10 kg/h 级及以下规格臭氧发生器使用空气源较合理 ,对于远离液氧产地的地区用户应用空气源更为经济、安全 ,对于大型臭氧系统 ,推荐制氧机纯氧源为主 ,用液氧作备用和补充。

据某公司制氧机提供的数据统计知 ,制氧机单位纯氧运行费用在 1.1~1.8 元/m<sup>3</sup> (电费按 1 元/(kW·h) 计)之间变化见图 3 ,其变化规律为 :纯氧流量小于 20 m<sup>3</sup>/h 时 ,单位纯氧运行费用较高 (1.4~1.8 元/m<sup>3</sup>) ;高于 20 m<sup>3</sup>/h 基本上稳定在 1.2 元/m<sup>3</sup>。因此 ,在选用制氧机时应尽量选大型 (纯氧流量大)的制氧机或组合 ,而不

宜选小型(低纯氧流量)的制氧机组合。

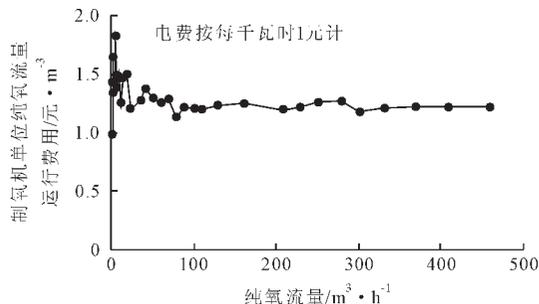


图3 B公司制氧机单位纯氧流量运行费用与纯氧流量的关系  
Fig.3 Relation between operation cost per unit volume of pure oxygen gas of an oxygen generator (Company B) and oxygen flow rate

制氧机单位水量运行费用与臭氧投加量、臭氧气体浓度有关。

臭氧投加量越高,所需臭氧总量越高,则所需臭氧流量和纯氧流量越大,则制氧机总运行费用越高,制氧机单位水量运行费用越高,见图4。

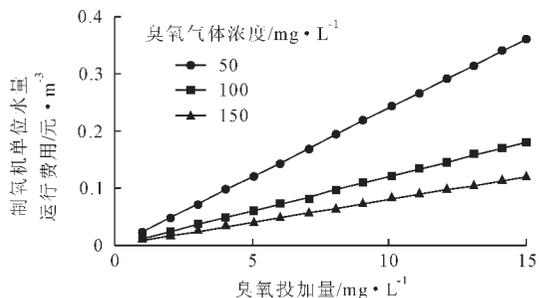


图4 B公司制氧机单位水量运行费用与臭氧投加量的关系  
Fig.4 Relation between operation cost per unit volume of wastewater of oxygen generator (Company B) and ozone dosage

在臭氧投加量和处理规模不变的情况下,所需臭氧产量不变,在一定范围内,臭氧气体浓度增加,所需的臭氧流量减小,即所需纯氧流量减小,则制氧机总运行费用降低,制氧机单位水量运行费用降低,见图5。

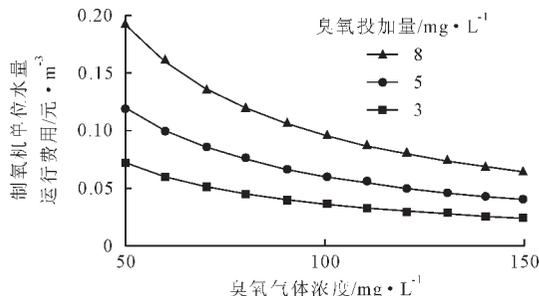


图5 B公司制氧机单位水量运行费用与臭氧气体浓度的关系  
Fig.5 Relation between operation cost per unit volume of wastewater of oxygen generator (Company B) and ozone gas concentration

### 1.2 臭氧尾气破坏系统运行费用

臭氧尾气破坏方法有热分解法、活性炭吸附法、催化分解法等,在我国应用广泛的是电热分解法。臭氧破坏处理系统运行费用受多种因素影响,不仅与不

同的臭氧分解方法有关,还与臭氧尾气流量(即臭氧流量)、臭氧尾气停留时间等因素。

(1)臭氧尾气流量对臭氧尾气系统运行费用的影响。一般说来,臭氧尾气流量越小,臭氧尾气破坏系统运行费用越低。臭氧尾气流量与臭氧流量基本相同,臭氧流量与处理规模、臭氧投加量、臭氧气体浓度有关,在确定处理规模的情况下,可通过降低臭氧投加量、采用高臭氧气体浓度,就可降低臭氧流量,即降低臭氧尾气流量,就可降低臭氧尾气片系统运行费用。

(2)臭氧尾气停留时间对臭氧尾气系统运行费用的影响。一般说来,臭氧尾气停留时间越短,臭氧尾气破坏系统运行费用越低。臭氧尾气停留时间与臭氧尾气浓度有关,臭氧尾气浓度越低,需要的处理时间越短,就可降低臭氧处理系统运行费用。臭氧尾气浓度与臭氧气体浓度和臭氧利用率有关,采用措施提高臭氧利用率,可降低尾气臭氧气体浓度,即可降低臭氧尾气处理系统运行费用。

据工程经验,电热分解法臭氧尾气破坏系统的单位水量功率为 0.003 6 kW/(m³/d),单位水量运行费用约为 0.003 6 元/m³(电费按 1 元/(kW·h)计)

### 1.3 污水再生处理臭氧氧化系统运行费用的组成

经统计,在污水再生处理臭氧氧化系统运行费用的组成部分中,臭氧发生系统运行费用所占比重最大(约为 95%~99%,其中制氧机电耗占 31%~57%,臭氧发生器电耗占 21%~33%,冷却水水耗占 21%~34%),臭氧尾气破坏系统运行费用所占比重最小(约为 1%~5%),见图6。

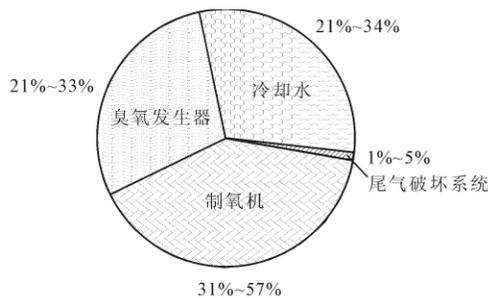


图6 污水再生处理臭氧氧化系统运行费用构成  
Fig.6 Consist of operation cost of ozonation process for wastewater advanced treatment and reuse

## 2 污水再生利用臭氧氧化系统运行费用影响因素分析

由臭氧氧化系统运行费用相关子系统运行费用的影响因素分析可知,臭氧投加量、臭氧气体浓度是影响臭氧氧化系统运行费用的主要因素。

### 2.1 臭氧投加量的影响及变化规律

臭氧氧化系统单位水量运行费用随臭氧投加量

的变化情况如图 7 所示。图 7 表明 臭氧投加量越大, 单位水量运行费用越高。在臭氧气体浓度为 100 mg/L 的情况下, 臭氧投加量由 1 mg/L 变化到 15 mg/L, 单位水量运行费用由 0.03 元/m<sup>3</sup> 增加到 0.45 元/m<sup>3</sup>。

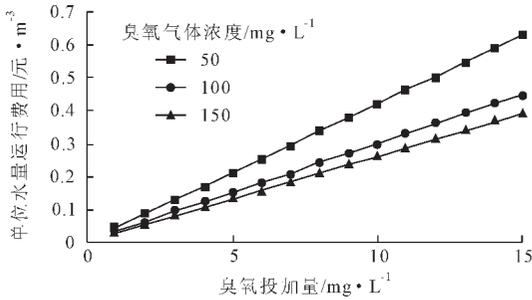


图7 系统运行费用与臭氧投加量的关系  
Fig.7 Effect of ozone dosage on operation cost of ozonation process for wastewater advanced treatment and reuse

### 2.2 臭氧气体浓度的影响

臭氧氧化系统单位水量运行费用随臭氧投加量的变化情况如图 8 所示。图 8 表明, 臭氧气体浓度越大, 单位水量运行费用越小。在臭氧投加量为 5 mg/L 的条件下, 臭氧气体浓度由 50 mg/L 变化到 150 mg/L, 单位水量运行费用由 0.21 元/m<sup>3</sup> 降到 0.13 元/m<sup>3</sup>。

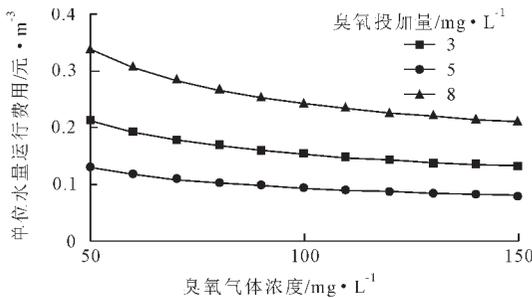


图8 系统运行费用与臭氧气体浓度的关系  
Fig.8 Effect of ozone gas concentration on the operation cost of ozonation process for wastewater advanced treatment and reuse

综上所述, 臭氧投加量和臭氧浓度是影响运行费用的主要因素。

### 3 结语

污水再生处理臭氧氧化系统运行费用主要由臭氧发生系统和臭氧尾气处理系统的运行费用组成, 其中臭氧发生系统运行费用所占比重最大(95%~99%), 臭氧尾气处理系统运行费用所占比重较小(约 1%~5%)。污水再生处理臭氧氧化系统运行费用的影响因素有臭氧投加量、臭氧气体浓度等工艺参数。臭氧投加量越小, 单位水量运行费用越低; 臭氧气体浓度越

高, 单位水量运行费用越低。

因此, 提高臭氧利用率, 降低臭氧投加量, 以及采用高臭氧气体浓度, 是有效降低污水再生处理臭氧氧化系统工程运行费用的主要措施。

### 【参考文献】

- [1] 弗兰克加朗. 全球水资源危机和中国的“水资源外交”[J]. 和平与发展, 2010(3): 66-68.  
Franck Galland. China's hydro-diplomacy[J]. Peace and Development, 2010(3): 66-68.(in Chinese)
- [2] 胡洪营, 吴乾元, 黄晶晶, 等. 城市污水再生利用面临的重要科学问题与技术需求[J]. 建设科技, 2010(3): 33-35.  
Hu Hong-ying, Wu Qian-yuan, Huang Jing-jing, et al. Important scientific problem and technologic requirement in municipal sewage reuse[J]. Construction Science and Technology, 2010(3): 33-35.(in Chinese)
- [3] 周彤. 污水回用: 解决城市缺水问题的有效途径[J]. 建设科技, 2002(1): 43-45.  
Zhou Tong. The efficient path in resolving water scarcity in city[J]. Construction Science and Technology, 2002(1): 43-45. (in Chinese)
- [4] 李国新, 颜昌宙, 李庆召. 污水回用技术进展及发展趋势[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(1): 79-83.  
Li Guo-xin, Yan Chang-zhou, Li Qing-zhao. Improvement and development trend of wastewater reuse technology [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(1): 79-83.(in Chinese)
- [5] 王晓昌. 臭氧用于给水处理的几个理论和技术问题[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1998, 30(4): 307-311.  
Wang Xiao-chang. Theoretical and technical aspects of ozonation in drinking water treatment[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 1998, 30(4): 307-311.(in Chinese)
- [6] 赵亮, 李星, 杨艳玲. 臭氧预氧化技术在给水处理中的研究进展[J]. 供水技术, 2009, 3(4): 6-10.  
Zhang Liang, Li Xing, Yang Yan-ling. Review of ozone pre-oxidation technology in drinking water production [J]. Water Technology, 2009, 3(4): 6-10.(in Chinese)
- [7] 上海市工程设计研究院. 给水排水设计手册: 第十册 技术经济分册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 8.  
Shanghai Municipal Engineering Design Institute. Handbook for Municipal Engineering Investment Estimate, Sewerage Engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Planning Press, 2008:3.(in Chinese)