

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.10.011

# 高出水标准下的再生水厂 COD 深度处理工艺比选

高伟楠

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

**摘 要:** 北京市某再生水厂设计规模为  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 出水水质执行北京市地方标准《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012) A 标准。该厂采用多段进水  $A^2O + \text{MBR}$  工艺作为主处理工艺, 由于其出水 COD 很难稳定达到京标 A 标准的要求 ( $\text{COD} \leq 20 \text{ mg/L}$ ), 需增加 COD 深度处理单元。对目前可选择的深度处理工艺——臭氧催化氧化、脉冲炭吸附、下向流炭吸附及活性焦吸附工艺就占地面积、投资、运行成本及工艺的实际应用情况进行了比较。结果表明, 臭氧催化氧化工艺占地面积最小, 脉冲炭吸附和下向流炭吸附工艺初期投资较低, 活性焦吸附及下向流炭吸附工艺运行成本更低。臭氧催化氧化、脉冲炭吸附、活性焦吸附工艺均有实际应用案例。综合考虑, 最终确定脉冲炭吸附和活性焦吸附工艺是现阶段较好的 COD 深度处理把关工艺。

**关键词:** 再生水厂; 高出水标准; 臭氧催化氧化; 脉冲炭吸附池; 下向流炭吸附池; 活性焦吸附床

**中图分类号:** TU992.3      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1000-4602(2020)10-0058-04

## Comparison and Selection of Advanced Treatment Process for COD Removal from Reclaimed Water Plants with High Effluent Quality

GAO Wei-nan

(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

**Abstract:** The effluent of a reclaimed water plant in Beijing, with a design scale of  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , implemented class A standard of Beijing local standard *Discharge Standard of Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants* (DB 11/890 - 2012) (Beijing standard A). It was proposed to adopt multi-stage water inlet  $A^2O + \text{MBR}$  process. Because it was difficult for the effluent COD to stably meet the requirements of the Beijing standard A ( $\text{COD} \leq 20 \text{ mg/L}$ ), advanced COD removal processing unit ought to be added. The theoretically feasible methods, such as the ozone catalytic oxidation, the pulsed carbon adsorption tank, the down-flow carbon adsorption tank and the activated coke adsorption bed process, were compared in terms of land occupation, investment, operating cost and practical application of the process. The results showed that ozone catalytic oxidation covers the smallest area. The initial investment of the pulsed carbon adsorption tank and the down-flow carbon adsorption tank was lower, and the operating cost of the activated coke adsorption bed and the down-flow carbon adsorption tank was lower. The ozone catalytic oxidation, the pulsed carbon adsorption tank, the active coke adsorption bed had practical application cases of the wastewater plant. Considering the above factors, it was concluded that the processes of pulsed carbon adsorption and activated coke adsorption were the better processes for COD removing advanced treatment at present.

**Key words:** reclaimed water plants; high effluent quality; ozone catalytic oxidation; pulsed carbon adsorption tank; down-flow carbon adsorption tank; activated coke adsorption bed

现阶段,国内对《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A、北京市地方标准《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)B 标准(京标 B 标准)等相似排放水质标准的污水厂设计经验较为丰富,工艺路线比选及确定也较为科学合理,但对京标 A 标准(或类似标准)的设计经验则相对较少。同京标 B 标准(或类似标准)相比,京标 A 标准的碳氮磷等污染指标更为严格,对于氨氮和  $\text{BOD}_5$ ,可在生物反应池解决;总氮可通过优化生物反应池或增加后端反硝化工艺单元实现;总磷可通过化学除磷实现。但如何经济高效地将 COD 从一级 A、准Ⅳ类标准的 50、30 mg/L 降低至 20 mg/L,尚需探索。目前,用于 COD 深度处理主要有高级氧化法、吸附法、膜分离等方法。高级氧化可利用羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )的强氧化能力直接降解大分子有机物。高级氧化技术包括 Fenton 氧化法、光催化氧化法、电化学氧化技术、臭氧氧化法等<sup>[1]</sup>,具有反应速度快、处理效率高、对有毒污染物破坏彻底、无二次污染、适用范围广、易操作等优点。吸附法<sup>[2]</sup>利用多孔性固体物质,使废水中的一种或多种物质吸附到固体表面而去除,其具有工艺简单、运行费用低、处理效果好的特点。吸附剂的种类很多,包括活性炭、活性焦、膨润土、硅藻精土、离子交换树脂等。膜分离技术<sup>[3]</sup>根据孔径大小可以分为微滤膜(MF)、超滤膜(UF)、纳滤膜(NF)、反渗透膜(RO)、电渗析(ED)等,该技术具有常温下操作、设备占地面积小、出水水质好等优点。

## 1 项目背景

北京市某再生水厂,设计规模为  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用以 MBR 为核心的工艺流程(见图 1),设计进、出水水质如表 1 所示。由于出水 COD 很难稳定达标,需增加 COD 深度处理单元。现阶段,国内外研究及应用较多的 COD 去除技术有臭氧催化氧化、炭滤池、脉冲炭吸附池及活性焦吸附床,需经过进一步技术比较确定工艺。

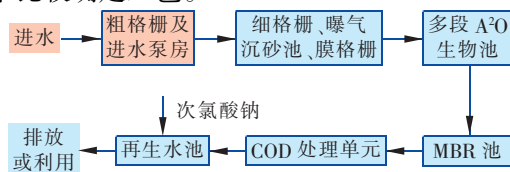


图 1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

mg · L <sup>-1</sup>						
项目	$\text{BOD}_5$	COD	SS	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
进水	250	420	320	35	50	7
出水	4	20	5	1.0(1.5)	10	0.2
注: 12 月 1 日—3 月 31 日执行括号内的排放限值。						

## 2 工艺设计

### 2.1 臭氧催化氧化

臭氧催化氧化既可以去除水中大量的有机物,又可以通过影响生物细胞的物质交换能力进行杀菌,因此在废水深度处理中的应用越来越广,其兼具脱色及 COD 去除功能。但目前臭氧氧化技术的应用仍受到一些因素的限制,如臭氧发生器所产生的臭氧浓度低、电耗大、设备及运行费用高等,这些问题的解决仍有待于进一步的研究与探索。

北京市门头沟第二再生水厂工程<sup>[4]</sup>即采用此工艺,是目前为数不多的高出水标准实际案例,其实际运行效果良好,出水水质满足设计预期。

与仅用于脱色的臭氧接触池不同,本次设计臭氧催化氧化池采用滤池形式,设计最大滤速为 7 m/h,总接触时间为 1 h,其中催化剂接触时间为 30 min,臭氧最大投加量为 30 mg/L。共分为 12 个系列,单系列滤床面积为  $9.2 \text{ m} \times 7.2 \text{ m}$ ,总占地尺寸为  $46.2 \text{ m} \times 28.4 \text{ m}$ 。

### 2.2 下向流炭吸附池

活性炭可用于除臭、除色度及去除水中大部分有机物质,对苯类、酚类化合物、石油、胶体及微生物等有较强的吸附能力,还能吸附部分微生物不能降解的或者化学法难以去除的有机物。炭吸附池采用下向流滤池形式,通过颗粒活性炭的吸附作用实现难降解 COD 的去除,其特点是工艺简单、处理效果好,但吸附饱和后需要再生或处理,操作不便。

炭吸附池在给水处理深度处理中应用较为广泛,但其应用于大、中型污水处理厂的案例较少。由于污水成分较为复杂,悬浮物及胶体数量及种类不明,可能存在活性炭饱和和时间过短的情况,如北京某大型污水厂采用炭吸附池去除色度,仅两个月时间即出现颗粒炭饱和现象,而颗粒炭的更换工程量巨大,是采用此工艺的最大瓶颈和潜在风险点。

本次设计炭吸附池共分为 6 个系列,呈双侧布置,主要由进水系统、吸附池及管廊间组成,管廊间

位于两系列炭吸附池中部,其内包括出水管、反冲洗水管、初滤水管、排空管、给水冲洗管、采样管等。炭吸附池单系列滤床面积为 $(13 \times 8) \text{ m}^2$ ,最大滤速为 $7 \text{ m/h}$ ,炭层厚度为 $2 \text{ m}$ ,空床接触时间为 $17.28 \text{ min}$ 。总占地尺寸为 $32.5 \text{ m} \times 51.5 \text{ m}$ 。

### 2.3 脉冲炭吸附池

脉冲炭吸附池为粉末活性炭悬浮床式澄清池,配备斜管以强化澄清效果,在投加粉末活性炭的情况下,上向流粉末活性炭吸附池适用于难降解 COD 的去除。由于采用粉炭对 COD 进行吸附,其最终以污泥形式排出系统,从而避免了活性炭再生或处理问题,但在一定程度上增加了系统的产泥量。

因脉冲炭吸附池滤速较低,故占地面积相对较大。市政污水厂采用脉冲炭吸附池或下向流炭吸附池去除 COD 的案例,国内鲜有报道:天津泰达西区污水处理厂采用类似工艺,经现场实地考察,处理效果良好。

脉冲炭吸附池主要由混合池、真空室、澄清池及污泥浓缩单元组成。本次设计包括混合池 1 座,单池容积为 $36 \text{ m}^3$ ;澄清池 2 座,单座过滤面积为 $565 \text{ m}^2$ ,最大滤速为 $3.83 \text{ m/h}$ ,真空室位于两座澄清池中部廊道上层。脉冲炭吸附池总占地尺寸为 $54 \text{ m} \times 27 \text{ m}$ 。

### 2.4 活性焦吸附床

活性焦吸附床采用下向流过滤器,吸附质为活性焦,属活性炭的一种,较颗粒活性炭具有更大的比

表面积,同时,与一般活性炭相比,价格低廉,着火点高,机械强度高。

活性焦在具有活性炭处理效果的同时,延缓或解决了很多活性炭吸附的固有缺陷,未来随着材料的不断深入研究,如能发现化学和生物稳定性强、容易再生的吸附剂,将使吸附技术具有更加广阔的实际应用前景。

浙江义乌佛堂工业污水厂(含 40% 市政污水)、郑州马头岗市政污水厂采用此工艺进行 COD 深度处理,出水水质满足设计要求。但由于反应器高度较高,且为设备形式,单个过滤器体量有限,罐体数量较多,虽然翻焦、加焦和排焦的设计能够延长活性焦的更换时间并使工作量分散化,但活性焦的再生及置换问题依然存在。

活性焦吸附床系统主要由活性焦吸附床、V 型滤池及设备间组成,本次设计活性焦吸附床共分为 2 组,每组 12 格,共 24 格,采用并联方式运行,单格尺寸为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ,滤料深度为 $7 \text{ m}$ ,最大滤速为 $7.4 \text{ m/h}$ ,为保证活性焦的吸附效果,需进行日常性的翻焦、排焦和加焦,过程中可能造成微小焦粒随出水流出影响出水 SS,故需设置 V 型滤池保证出水水质,滤池最大滤速为 $11.6 \text{ m/h}$ 。活性焦吸附床系统占地面积为 $49.2 \text{ m} \times 56.0 \text{ m}$ 。

### 3 工艺比较

对上述工艺在占地面积、工程投资、运行成本等方面的比较见表 2。

表 2 COD 深度处理工艺比较

Tab. 2 Comparison of various processes of COD advanced treatment

项 目	臭氧催化氧化	下向流炭吸附池	脉冲炭吸附池	活性焦吸附床
表面负荷/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	7	7	3.83	7.4
占地面积/ $(\text{m} \times \text{m})$	$46.2 \times 28.4$	$32.5 \times 51.5$	$54 \times 27$	$49.2 \times 56.0$
单位占地面积/ $(\text{m}^2 \cdot 10^4 \text{ m}^{-3})$	164.01	209.20	182.25	344.40
设备投资/万元	3 600	1 300	1 650	3 250
吨水总投资/ $(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	613	338	419	756
总投资/万元	4 900	2 700	3 350	6 050
运行成本/ $(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0.54	0.20	0.36	0.24
注: 运行成本按照电价 $0.75 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、颗粒活性炭 $10\,000 \text{ 元}/\text{t}$ 、粉末活性炭 $6\,500 \text{ 元}/\text{t}$ 、活性焦 $4\,500 \text{ 元}/\text{t}$ 、混凝剂 $650 \text{ 元}/\text{t}$ 、PAM $20\,000 \text{ 元}/\text{t}$ 、液氧 $800 \text{ 元}/\text{t}$ 计算。				

#### ① 占地面积

本工程中,臭氧催化氧化、炭吸附池及活性焦吸附床工艺负荷相似,均在 $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 左右,脉冲炭吸附池负荷略低,一般小于 $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,本工程采用 $3.83 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。但是,由于各单元配套

用房及设备间大小不一,综合下来,臭氧催化氧化滤池占地面积最小,为 $46.2 \text{ m} \times 28.4 \text{ m}$ ,如采用三段式催化氧化池,其占地面积可进一步降低。

臭氧催化氧化、脉冲炭吸附池、下向流炭吸附池及活性焦吸附床的单位占地分别为 $164.01$ 、 $182.25$ 、



209.20, 344.40  $\text{m}^2/10^4 \text{m}^3$ 。从占地角度考虑,臭氧催化氧化工艺更优,炭吸附池次之。

## ② 工程投资

工程投资主要由设备费用及土建费用两部分构成。臭氧催化氧化工艺总投资约 4 900 万元,折合吨水投资 613 元,主要包括臭氧发生系统及催化剂两部分。脉冲炭吸附工艺总投资约 3 350 万元,折合吨水投资 419 元,主要包括脉冲发生系统及附属药剂投加系统。下向流炭吸附池总投资约 2 700 万元,吨水投资 338 元,主要为炭滤池进出水及反洗设备和活性炭填料。活性焦工艺总投资约 6 050 万元,吨水投资 756 元。可以看出活性焦工艺土建费用及设备费用均较高,主要因为其反应器为模块化,容积较大,配套设备较多。对于臭氧催化氧化工艺,较高的臭氧发生量决定了其高昂的臭氧发生设备费用,与此同时为降低运行成本而增加的催化剂初期投资亦是一笔不小的费用。

综上,从工程投资角度考虑,脉冲炭吸附池和下向流炭吸附池具有明显优势,其中下向流炭吸附池投资更低。

## ③ 运行费用

运行费用主要包括药剂费、电费及催化剂(活性炭滤料)的损耗费用。臭氧催化氧化工艺由于臭氧发生器用电量较大,其运行成本最高,为 0.54 元/ $\text{m}^3$ ;脉冲炭吸附池采用粉炭吸附去除 COD,粉炭消耗量较大,吨水成本为 0.36 元/ $\text{m}^3$ ;下向流炭吸附池和活性焦吸附床运行费用较低,其吨水成本分别为 0.20 和 0.24 元/ $\text{m}^3$ 。

经比较,臭氧催化氧化占地面积最小,脉冲炭吸附池和下向流炭吸附池初期投资较低,活性焦吸附床及下向流炭吸附池运行成本更低。综合考虑上述因素,最终确定脉冲炭吸附和活性焦吸附工艺是现阶段较好的 COD 去除深度处理把关工艺。

## 4 结论

臭氧催化氧化、脉冲炭吸附池、下向流炭吸附池及活性焦吸附床均具有实现 COD 深度去除的理论可行性,且除下向流炭吸附池外,其他 3 种工艺均具有大中型污水处理厂实际应用案例。经比较,臭氧催化氧化占地面积最小,脉冲炭吸附池和下向流炭吸附池初期投资较低,活性焦吸附床及下向流炭吸附池运行成本更低。综合考虑,确定脉冲炭吸附和活性焦吸附工艺是现阶段较好的工艺选择。

## 参考文献:

- [1] 江传春,肖蓉蓉,杨平. 高级氧化技术在水处理中的研究进展[J]. 水处理技术,2011,37(7):12-16,33.  
Jiang Chuanchun, Xiao Rongrong, Yang Ping. Research process of advanced oxidation processes in wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(7):12-16,33(in Chinese).
- [2] 巴能军,周志伟,董俊,等. 助滤和再生粉末活性炭吸附技术用于工业废水深度处理[J]. 给水排水,2017,43(2):71-74.  
Ba Nengjun, Zhou Zhiwei, Dong Jun, et al. Application of aided filtration and activated carbon adsorption technology in advanced treatment of industrial wastewater[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(2):71-74(in Chinese).
- [3] 赵维春,徐晓波. 无机膜分离技术在水处理中的应用研究[J]. 中国给水排水,2015,31(10):38-40.  
Zhao Weichun, Xu Xiaobo. Application research of inorganic membrane separation technology in wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(10):38-40(in Chinese).
- [4] 刘议安,冯凌溪,王平,等. 高出水标准下北京门头沟地下式再生水厂的设计[J]. 中国给水排水,2018,34(2):73-75,90.  
Liu Yian, Feng Lingxi, Wang Ping, et al. Design of Beijing Mentougou underground reclaimed water plant with high effluent quality requirement[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2):73-75,90(in Chinese).



作者简介:高伟楠(1989-),男,内蒙古锡林浩特人,硕士,工程师,主要从事给排水工程设计与水环境恢复研究等工作。

E-mail:15801387865@126.com

收稿日期:2019-11-29