

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.016

# 大型地下式污水处理厂中臭氧处理工艺的设计

颜廷文, 邴竞尧, 刘世德

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 天津市某大型地下式污水处理厂采用臭氧工艺作为深度处理工艺,用于去除污水中的难降解 COD。该工程设计规模为  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水水质达到天津地标 A 标准的要求。臭氧工艺系统主要包括液氧站、臭氧制备间、臭氧接触池、尾气破坏器间等。详细介绍了臭氧系统各处理单元的设计细节、设备排布以及管道路由等。设计要点包括:制备间靠近箱体外边缘布置;发生器室设计三面防爆墙,一面泄压墙;外循环冷却水回水至超滤出水渠道,可节省冷却水的用量;每组臭氧接触池分两个点投加臭氧,投加比例为 1:1。设计重点考虑了臭氧系统各建(构)筑物之间的整体关联性,以保证臭氧系统的出水水质。

**关键词:** 臭氧工艺; 地下式污水处理厂; 箱体设计

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0089-06

## Design of Ozonation Process in Large Underground Sewage Treatment Plant

YAN Ting-wen, PI Jing-yao, LIU Shi-de

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** A large underground sewage treatment plant in Tianjin adopted ozonation technology as an advanced treatment process to remove refractory COD in sewage. The design treatment capacity of the project was  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , and the effluent water quality was required to meet the limitations of Tianjin local A discharge standard. Ozonation process system mainly consisted of liquid oxygen station, ozone preparation room, ozone contact tank, exhaust destruction room, etc. The present work mainly discussed the overall process design of the ozone system, and introduced the design details of each treatment unit, equipment arrangement and pipeline routing. The key points were as follows: the preparation room was arranged near the outer edge of the box; the generator room was designed with three explosion-proof walls and one pressure-relief wall; external circulation of cooling water flowed back to ultrafiltration outlet channel to save the consumption of cooling water; each group of ozone contact tank had two feeding points with dosage ratio of 1:1, etc. The design focused on the overall relationship among various structures of the ozone system to ensure the effluent water quality of the ozone system.

**Key words:** ozonation process; underground sewage treatment plant; box design

近年来,随着污水处理厂出水水质标准的提高,臭氧工艺已经越来越多地应用于市政污水的深度处理<sup>[1]</sup>。随着地下空间开发技术的不断完善,越来越多的地下污水处理厂建成运行。臭氧工艺从原理上并不复杂,但在设计方面,其中的很多细节稍有忽视,就会对整个深度处理工程的效果产生较大的影

响<sup>[2]</sup>。天津市某大型地下式污水处理厂即采用臭氧工艺作为深度处理工艺,用于去除污水中的难降解 COD。

### 1 工程概况

#### 1.1 设计规模及进、出水水质

该工程设计规模为  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,变化系数取

1.30, 建设为半地下式污水处理厂<sup>[3]</sup>。

工程出水水质要求达到天津市地方排放标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)中 A 标准,具体见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
进水水质	680	315	290	80	50	9
出水水质	30	6	5	10	1.5(3)	0.3

### 1.2 处理工艺

从表 1 可以看出,本工程进水 COD 超过了《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ 343—2010),且出水标准要求较高。因此,深度处理阶段要着重考虑对难降解 COD 以及色度的去除。从日常运行成本和技术应用成熟度等方面考虑,综合地下式污水处理厂的特点,臭氧氧化工艺、粉末活性炭工艺和芬顿工艺是较好的比选工艺。

芬顿工艺在本工程中有如下缺点:运行过程中需要在污水中投加大量酸,待处理完成后还要投加大量碱回调 pH 值,最后会生成大量化学污泥,每一步工序均需要增加大量运行成本;一旦进水 COD 构成发生变化,pH 值以及过氧化氢和亚铁离子投加量

与投加比例也必须相应快速调整,生化进出水水质波动频繁且幅度大,芬顿工艺很难快速适应这种变化;随着进水水质波动,芬顿工艺出水 COD 无法稳定达到 30 mg/L 以下。因此,本工程不推荐采用芬顿工艺。

臭氧氧化工艺和粉末活性炭工艺的比较如表 2 所示。

表 2 臭氧氧化和粉末活性炭工艺比较

Tab. 2 Comparison of ozone process and powdered activated carbon process

项目	臭氧氧化工艺	粉末活性炭工艺
优点	处理效果稳定;去除有机物彻底;运行简单;运行成本低,应用案例多	处理效果较好;过程简单,耗电量小;投资低
缺点	运行管理水平要求高;初期投资较高,耗电量较大	粉末活性炭投加大,工人劳动强度大,污泥量大,处理成本高,大规模市政污水应用案例少。受粉末活性炭价格影响,运行成本远高于臭氧工艺

可见,粉末活性炭吸附法投加大、运行成本较高,按照天津市的实际状况,采用粉末活性炭处理工艺比臭氧工艺处理费用高约 0.18 元/m<sup>3</sup>。故本工程选用臭氧氧化法。

本工程工艺流程见图 1。

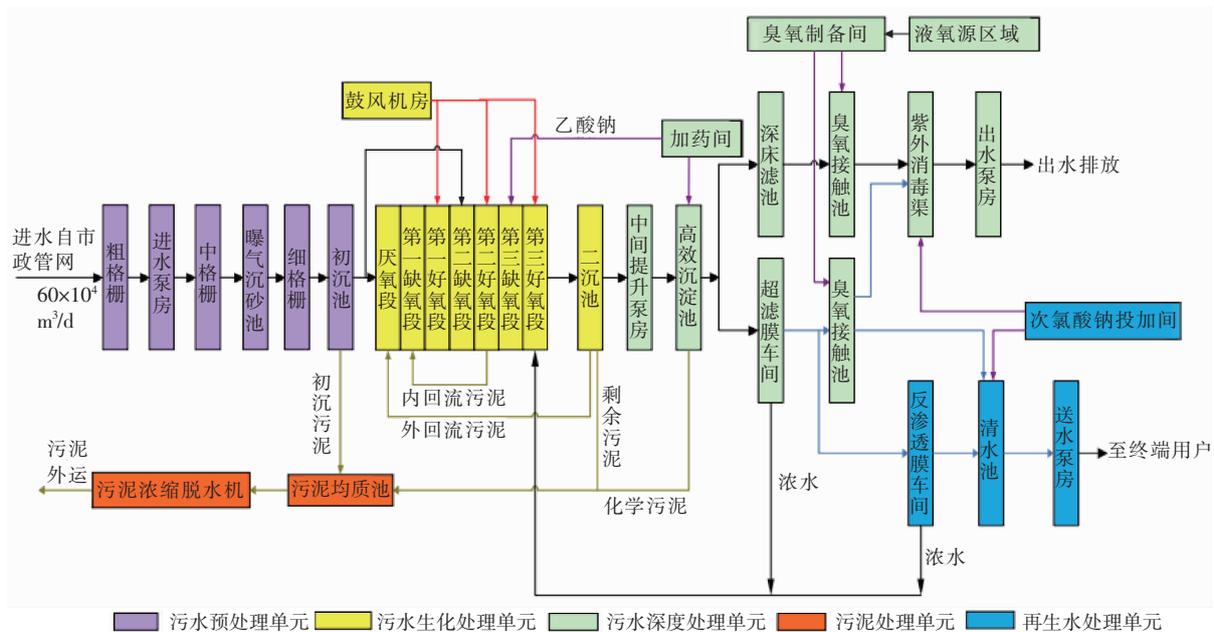


图 1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

本工程位于一座郊野公园内,采用半地下式双层加盖的布置方式。

箱体靠近郊野公园一侧全面覆土并进行立体绿化,布置形式见图2。

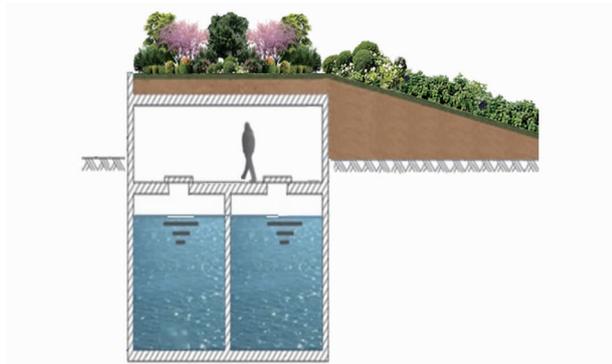


图2 污水处理厂布置形式

Fig.2 Layout of the sewage treatment plant

## 2 臭氧工艺设计

### 2.1 臭氧技术在地下式污水厂的应用

与常规地上污水处理厂相比,地下式污水处理厂的臭氧工艺操作管理相对不方便,投资及运行费用较高,建设难度较大,但应用在部分土地匮乏或环境要求较高的区域,具有以下优点:

#### ① 占用空间少

在地下污水处理厂的臭氧工艺设计中,考虑到地下空间和投资的限制,与臭氧相关的构筑物设计都比较紧凑,尽量减小占地面积。此外,地下污水处理厂的臭氧工艺无需考虑与其他构筑物的安全间距等要求,因此,一般占地面积较少。

#### ② 噪声污染小

地下污水处理厂主要的臭氧设备均处于地下,许多机械的噪声和振动基本不会对地面的建筑和居民产生影响。

#### ③ 环境污染小

由于处于地下全封闭管理,地下污水处理厂可以对产生的臭氧尾气进行全面处理,对环境和城市居民生活不产生影响。

#### ④ 温度较恒定

地下污水处理厂处于地下,温度比较恒定,有利于臭氧处理工艺的稳定运行。

#### ⑤ 美观性好

污水厂上部空间是郊野公园,能够与周边的自然景观融为一体,并且不会影响到周围建筑的整体视觉效果。

### 2.2 臭氧系统设计要点

本项目臭氧系统由气源、发生系统、接触池、尾

气破坏系统和控制系统五部分组成。其中,气源位于液氧站;发生系统、控制系统位于臭氧制备间;尾气破坏系统位于接触池上。

深度处理阶段去除的COD均为难降解COD,去除难度较大,需要利用臭氧的强氧化作用去除。故应严格控制进水的COD组成,尤其需要严格控制难降解成分含量较高的工业废水进入。

建议应控制进水中的难降解COD含量不高于40 mg/L。

#### 2.2.1 液氧站

臭氧气源主要有三种,包括使用成品纯液态氧、现场用空气制备纯气态氧和直接利用空气。为了提高臭氧浓度,同时节省能耗,降低设备及管道尺寸,本项目的臭氧发生器采用第一种方式制备臭氧,液氧罐采用租赁的形式。

液氧站设液氧储罐6台,每台 $V=60\text{ m}^3$ ,配套液氧汽化器、连接管道及阀门各6套。液氧通过液氧汽化器蒸发汽化后,混合一定量氮气后进入发生器。氮气要经过压缩、预冷、过滤和干燥等预处理,使原料气达到臭氧发生器所要求的质量、流量、压力、露点等要求。

#### 2.2.2 臭氧制备间

臭氧制备间位于箱体上层,其功能是制备臭氧,为去除COD并脱色提供氧化剂。

##### ① 设计参数

设计臭氧高峰投加量为750 kg/h,平均投加量为250 kg/h,臭氧投加浓度为10%,露点 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。按照高峰投加量无备用考虑,设臭氧发生器5台,单台流量为150 kg/h,功率为1395 kW。设冷却水循环泵5台(4用1备),流量为310  $\text{m}^3/\text{h}$ ,扬程为250 kPa,功率为30 kW。

##### ② 总体布置

由于地下污水厂箱体布置紧凑,在保证安装距离及检修距离的基础上,臭氧制备间的平面尺寸为 $59.57\text{ m}\times 35.3\text{ m}$ 。

整个臭氧制备间分为四个部分:发生器室、附属设备间、供电单元间、配电间。

臭氧制备间内的大型设备较多,且发生器室需要防爆设计,在综合各处理构筑物之间的相对位置关系后,将制备间靠近箱体外边缘,设计有可以出入箱体的卷帘门,便于大设备的运输。臭氧制备间下层设计为清水池,设备较少,为了使清水池进出水闸

门启闭机设置在臭氧制备间外,清水池平面占地比臭氧制备间略大。

臭氧制备间平面布置见图3。



图3 臭氧制备间平面布置

Fig. 3 Plane layout of ozone preparation room

### ③ 发生器室设计要点

由于臭氧有防爆要求,因此发生器室面对箱体内部的三面墙均设计为防爆墙,与其他房间的连接管道布置在管沟内,对防爆墙无影响。东侧的外墙及房顶面向箱体外,设计为泄压墙。

臭氧一旦泄漏在箱体内部,极易产生爆炸,因此至污水接触池的臭氧出管设计为沿箱体外部敷设,以降低臭氧管道对整个箱体的影响。采用同样设计方法的还有臭氧尾气管道,为了与污水接触池的尾气一同处理,将制备间的尾气收集至污水接触池池顶的尾气间内。

为了使原料气达到臭氧发生器所要求的质量、流量、压力、露点等要求,氧气进气管路上除了一般的阀门外,还设置有氮气比例自动投加控制器及入口自动调压阀等。

发生器及氧气进管管路上均设计有氧气安全泄压管,泄压管始于发生器末端或氧气过滤器球阀之后,终端排至室外。排至室外的氧气安全泄压管末端设计为向上的管道,并配有防雨帽。

发生器室的剖面设计图见图4。臭氧发生器实物见图5。

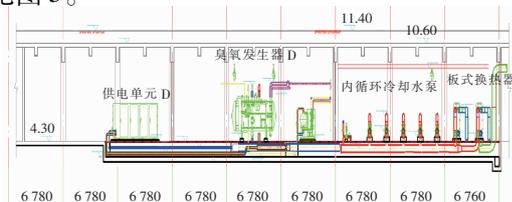


图4 臭氧制备间剖面图

Fig. 4 Cross section of ozone preparation room



图5 臭氧发生器

Fig. 5 Ozone generator

### ④ 附属设备间设计要点

臭氧发生器连续运行过程中,会产生大量的热量,需要用冷却水通过热交换过程来降低臭氧发生器的温度,使臭氧发生器运行稳定。臭氧发生器闭路循环冷却水系统由板式换热器及配套仪表、阀门、管路及管件系统等组成。冷却水水管上装有流量开关,冷却水温度最高不超过30℃。

附属设备间中的主要设备除了板式换热器之外,还有冷却水泵及空气压缩系统。其中有6种水管需要布置在管沟中,因此管沟的高效利用是设计难点。在下层超滤出水渠道与结构柱之间设置管沟,内外循环水管及板式换热器进水管均紧凑布置在1m深管沟里,管沟一直延伸至发生器室。

板式换热器进出水一共有4种接口,分为外循环水进出水及内循环水进出水。外循环冷却水进水自污水臭氧接触池,经箱体内部再进入附属设备间后沿墙壁向下进入管沟,再连接至进水口。外循环冷却水回水至超滤出水渠道,超滤出水渠道在板式换热器正下方,这样的设计能最大程度地节省冷却水用量。

内循环冷却水经板式换热器冷却后,由内循环冷却水泵送至发生器。内循环水在密封的管道中循环使用,为了第一次注水及运行后补充损失水量,附属设备间内设置高位补水箱。

### ⑤ 设备材质的选择

由于臭氧的特殊性质,臭氧制备间内的设备、管道、阀门等需要采用防腐蚀的材质。总体分为以下几类:以氧气和冷却水为介质的设备、管道、管件、阀门、储气罐等,采用SS304材质;以臭氧为介质的设备、管道、管件、阀门等,采用SS316L材质。管沟上

覆的钢格板采用防腐的玻璃钢材质。

### 2.2.3 臭氧接触池

臭氧接触池位于箱体下层,采用钢筋混凝土矩形结构。其功能是使污水与氧化剂反应,去除 COD 并进行脱色除味。

#### ① 设计参数

臭氧接触池设计流量为  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,变化系数取 1.3,共 6 个系列,每个系列都可以单独运行,平均流量下停留时间为 50 min。设臭氧尾气破坏系统 2 套,与臭氧发生器配套供应,功率为 150 kW。设一级增压水泵 8 台(6 用 2 备),流量为  $750 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为 450 kPa,功率为 132 kW。设二级增压水泵 8 台(6 用 2 备),流量为  $625 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为 450 kPa,功率为 110 kW。

#### ② 总体布置

污水臭氧接触池位于箱体东南角,距离东侧的臭氧制备间较近。总平面尺寸为  $70.2 \text{ m} \times 60.9 \text{ m} + 25.8 \text{ m} \times 7.03 \text{ m}$ 。

接触池主要分为三个部分:增压水泵房、接触池 A~F、尾气破坏器间。增压水泵房设置在西侧,邻近箱体内车道,便于水泵等设备的运输。尾气破坏器间位于池顶南部,靠近箱体外侧,可缩短臭氧尾气管路路由,且便于处理后尾气的外排。

#### ③ 增压水泵房设计要点

增压水泵房中设置三种泵,分别为一级增压水泵 8 台、二级增压水泵 8 台、外循环冷却水泵 4 台。水泵统一布置在接触池西侧,一级加二级水泵为一组,每一组增压水泵为一个系列的接触池提供增压水。每级备用泵的出水管路连接至各个增压水泵的出水管路上。水泵出水至辐流曝气器的这部分路由设计复杂,需要错开纵向排列的备用泵出水管路及外循环冷却水管,因此增压水泵出水管多利用  $45^\circ$  及  $90^\circ$  弯头,在尽量减少水头损失的基础上,合理均布出水管路。

外循环冷却水管自臭氧接触池至臭氧制备间板式换热器。将外循环冷却水泵设置在增压水泵房中,目的是为了取臭氧接触池前池的水作为冷却水,这样冷却水可以在整个污水系统中循环,避免水量浪费。

增压水泵房设置两个楼梯间,目的是方便泵房和上层配电间之间的人员流动。楼梯间位于泵房南北两侧靠墙处,以避让泵房中央南北向的电动葫芦

及泵房顶部预留的水泵吊装孔。

#### ④ 接触池设计要点

臭氧管道自箱体外进入接触池顶部管沟,均匀分配至 6 个系列。臭氧接触池的臭氧分为两级投加。在设计流量下,臭氧最大投加量为  $30 \text{ mg/L}$ ,每组臭氧接触池臭氧分前后两个点投加,前后投加比例为 1:1。

每组接触池投加管路皆配置流量计、自动流量调节阀、压力表等,根据设定值自动调节每组接触池的臭氧投加量。每个投加点均配置有现场流量计、压力表及手动调节阀等。

池顶安装的水射器将臭氧与增压水充分接触形成臭氧溶解水后,通过接触池内的扩散器使臭氧溶解水与接触池原水充分反应。同一个系列的水池中设计两套圆柱形辐流曝气器,为避免紊流,两个辐流曝气器中间以隔墙分隔,形成正方形的曝气池形式。

为保证池体内密闭气体的压力恒定,每组臭氧接触池顶部设置双向透气安全阀。接触池内的尾气经除雾器去除水雾后,通过管道输送至位于池顶的尾气破坏器。除雾器设置喷淋管,自泵后增压水管道取水。为方便检修,臭氧接触池设有密封人孔,密封垫采用四氟橡胶。

由于臭氧具有很强的氧化性,因此,臭氧接触池上臭氧第一投加点后的各种管道及其附件均采用不锈钢 SS316L 制作。

出水洞口上方设置喷淋水管,目的是冲洗水面浮渣,以免浮渣进入后续的紫外消毒渠。

出水堰的跌水方向为反向设计  $30^\circ$  坡度,目的是增加跌水阻力,使水中的残留臭氧逸出,不影响后续工艺。

#### ⑤ 尾气破坏器间设计要点

臭氧尾气包括两部分,分别是除雾器尾气管路以及臭氧制备间尾气管路。为缩短尾气管道路由,将尾气破坏器间设置在臭氧接触池池顶的东南角,靠近除雾器一侧及箱体外侧,平面尺寸为  $14.6 \text{ m} \times 12.64 \text{ m}$ 。设置有面向箱体外的设备出入口及面向接触池的人员进出门。

尾气破坏器间也有防爆要求,因此除雾器尾气管从接触池池顶绕至箱体外,与臭氧制备间尾气管合并之后,通过管沟进入房间,输送至两台尾气破坏器。

为防止人员烫伤,尾气破坏器出气管道在尾气

破坏器间内高架布置,并做保温处理。保温见标准图集《管道和设备保温、防结露及电伴热》(03S401),保温材料选用《建筑材料及制品燃烧性能分级》(GB 8624—2012)中 A1 级材料,介质温度为 150 ℃,采用厚度为 0.8 mm 的铝箔玻璃钢薄板复合保护层。尾气破坏器出气管道末端设计为向上的管道,并配有防雨帽,排放高度高于箱体顶,并需要远离火源排放。

尾气破坏器间见图 6。

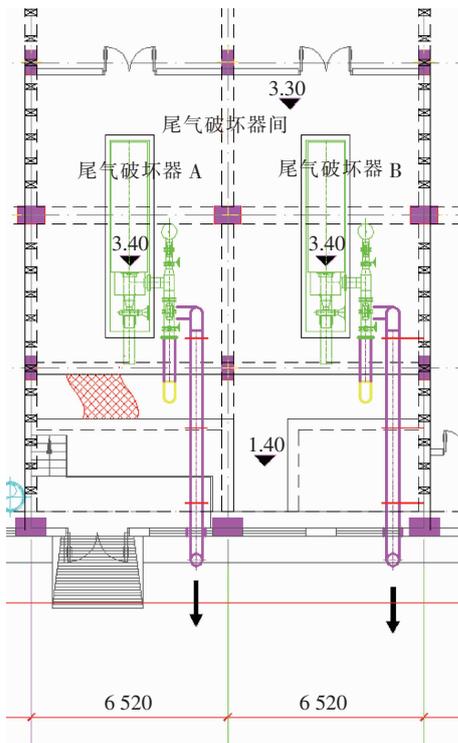


图 6 尾气破坏器间平面布置

Fig. 6 Plane layout of exhaust destruction room

### 3 结论

天津市某大型地下式污水处理厂的工程实例采用臭氧工艺作为深度处理工艺,以去除污水中的难降解 COD。从设计参数、总体布置、设计要点等几个方面总结了臭氧制备间、臭氧接触池等建(构)筑物的关键设计细节,可为同类工程提供参考和借鉴。

### 参考文献:

- [1] 杨勇,蒋岚岚. 臭氧在市政污水处理中的应用[J]. 给水排水,2009,35(增刊):255-257.  
YANG Yong, JIANG Lanlan. Application of ozone in municipal wastewater treatment[J]. Water & Wastewater Engineering,2009,35(S):255-257(in Chinese).
- [2] 邵世云,刘平,崔孝光. 臭氧-活性炭在净水厂设计中若干问题的探讨[J]. 给水排水,2014,40(9):13-17.  
SHAO Shiyun, LIU Ping, CUI Xiaoguang. Probe into some problems of the process of ozone-activated carbon in water treatment plant design [J]. Water & Wastewater Engineering,2014,40(9):13-17(in Chinese).
- [3] 徐晓波,崔洪升,刘世德. 地下污水处理厂的安全设计分析及建议[J]. 中国给水排水,2017,33(10):17-21.  
XU Xiaobo, CUI Hongsheng, LIU Shide. Safety design analysis and suggestions for underground wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater,2017,33(10):17-21(in Chinese).

作者简介:颜廷文(1988-),女,天津人,硕士,工程师,主要从事污水处理厂、给水厂等市政工程给排水工艺的设计和研究工作。

E-mail:hpyantingwen@126.com

收稿日期:2020-07-05

修回日期:2020-07-19

(编辑:孔红春)

绿水青山就是金山银山