

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.10.003

## 污水处理厂臭氧处理系统的设计要点

刘巨波

(北京首创股份有限公司, 北京 100028)

**摘要:** 臭氧氧化工艺在混有较高比例工业废水进入的城镇污水处理厂及对出水水质要求较高的再生水厂已有广泛应用,但臭氧处理系统较之常规污水处理工艺又有其明显的特殊性。为高效、经济、安全地应用臭氧处理系统,基于臭氧制备原理及发生器正常工作要求、臭氧的物理与化学性质、臭氧工艺目标及其分别对应的经验工艺参数,并结合相关工程设计、施工与运行案例,探讨了臭氧发生器气源系统、臭氧制备系统、臭氧输送系统、臭氧投加及反应系统等各阶段易忽视的工艺设计、设备选型及施工要点。另外,针对臭氧处理工艺的消防与防爆设计要点、安全仪表的配置进行了归纳总结。

**关键词:** 污水处理厂; 臭氧处理系统; 工艺设计; 安全生产

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)10-0013-06

## Design Key Points of Ozone Treatment System in WWTPs

LIU Ju-bo

(Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** The process of ozone oxidation has a very wide range of application in WWTPs with high proportion of industrial wastewater and reclaimed water plants with high effluent quality requirements, but ozone treatment system has obvious particularity compared with conventional wastewater treatment process. For the purpose of applying the ozone treatment systems efficiently, economically and safely, based on the principle of ozone generation, the normal operating requirements of generator, the physical and chemical properties of ozone and the ozone process objectives and their corresponding empirical process parameters, combined with relevant engineering design, construction and operation cases, this paper discussed the process design, equipment selection and construction key points of gas source system, ozone generation system, ozone delivery system, ozone dosing and reaction system which were easily neglected. In addition, the fire protection and explosion-proof design key points and safety instrument configuration of ozone treatment process were summarized.

**Key words:** WWTPs; ozone treatment system; process design; safe production

臭氧是一种氧化能力仅次于氟、 $\cdot\text{OH}$ 、原子氧的强氧化剂<sup>[1]</sup>,通过臭氧可去除水中色度、嗅;可降低高锰酸盐指数,使难降解的高分子有机物得到氧化、降解;同时具有消毒、灭菌等作用。当出水水质要求较高或原水中存在难降解有机物时,臭氧氧化及其组合工艺具有较好的处理效果;另一方面,相对于传统城镇污水处理工艺,臭氧氧化工艺具有投资

及运行成本较高、运行操作相对复杂且具有一定危险性等特点。

综上,臭氧氧化及其组合工艺设计的合规性与合理性,直接影响了处理效果、工程投资、运行成本及生产安全性。为此,对臭氧处理系统设计重点和易忽视的问题进行归纳总结,并进行探讨分析,以期同类项目提供参考。

## 1 臭氧处理系统工艺设计要点及分析

### 1.1 气源系统设计要点

#### 1.1.1 气源系统的选择

工业用臭氧通过对氧气的高压放电而形成。供给臭氧发生器的气源可以为空气(CDA),也可以是纯氧。纯氧可以现场制备(V-GOX),也可以购买液氧(LOX)通过蒸发获得。气源不同,臭氧发生器的配套系统费用、原料费用、运行成本以及运行维护工作量等均有较大差别。假设液氧采购及运输条件允许,当臭氧发生规模 $>60\text{ kg/h}$ 时,采用空气源作为臭氧发生器的气源才具有经济性;工程应用中当臭氧系统总制备能力 $\leq 60\text{ kg/h}$ 时,选用液氧作为臭氧发生的气源较为经济<sup>[1]</sup>。就不同气源的典型指标而言,CDA源臭氧发生器电耗一般为 $15\sim 25\text{ kW}\cdot\text{h/kgO}_3$ ,制得的臭氧额定质量浓度约 $1\%\sim 2\%$ ;LOX源臭氧发生器电耗一般为 $8\sim 10\text{ kW}\cdot\text{h/kgO}_3$ ,制得的臭氧质量浓度约 $6\%\sim 10\%$ ,发生器经济性最佳时臭氧浓度在 $10\%$ 左右;V-GOX源臭氧发生器电耗一般为 $8\sim 10\text{ kW}\cdot\text{h/kgO}_3$ ,制得的臭氧质量浓度约 $6\%\sim 10\%$ <sup>[2]</sup>。

#### 1.1.2 空气源系统设计要点

空气源系统主要由空压机、后部冷却器、缓冲罐、过滤器、干燥机、稳压储气罐、管路阀件、配套仪表等组成。臭氧发生器用压缩空气的要求:粉尘颗粒尺寸为 $1\text{ }\mu\text{m}$ ,最大浓度为 $1\text{ }\mu\text{g/L}$ ,最大压力露点为 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,最大含油浓度为 $1\text{ }\mu\text{g/L}$ <sup>[2]</sup>。

#### 1.1.3 液氧源系统设计要点

液氧源系统一般由液氧储罐、储罐远程液位监控系统、液氧气化系统、调压阀组、过滤设备等组成。液氧储罐一般通过租赁方式,由专业气源供应商进行系统的设计、安装、调试、运维,但仍需注意以下几方面:

① 液氧转运罐车为大型货车,通常液氧站附近路宽不应小于 $6\text{ m}$ ,转弯半径不宜小于 $14\text{ m}$ ;

② 液氧站典型占地尺寸为 $5\text{ m}\times 10\text{ m}$ ;

③ 液氧罐储存量一般为 $3\sim 5\text{ d}$ 的用量,氧气纯度一般为 $99.5\%\sim 99.9\%$ ,杂质颗粒尺寸 $<0.1\text{ }\mu\text{m}$ ;

④ 液氧气化系统一般应考虑设置1用1备,另外,对于北方地区,应考虑环境低温时的蒸发能力,设计中应预留电加热的电负荷和装置<sup>[3]</sup>;

⑤ 经过调压阀组后的表压一般为 $0.3\text{ MPa}$ ;

⑥ 调压阀组后应设露点仪,氧气常压露点一般为 $-65\text{ }^\circ\text{C}$ ,其将影响发生器放电均匀性;

⑦ 氧气输送管线应采用GC3级不锈钢压力管线,连接方式宜为焊接,焊接前应进行酸洗钝化、清洗、脱脂处理<sup>[4]</sup>;

⑧ 氧气输送管线工作压力为 $0.1\sim 1\text{ MPa}$ 时,工作压力下的最高允许流速为 $30\text{ m/s}$ ,通常设计流速取 $10\text{ m/s}$ ;

⑨ 氧气输送主管应敷设于管沟内,寒冷地区应考虑保温措施,管沟应尽可能顺直,且避让主要通行道路;

⑩ 氧气管道、管架与道路及建(构)筑物的最小间距应符合规范要求。

#### 1.1.4 现场制氧气源系统设计要点

现场制取氧气的方法主要有低温精馏和吸附分离两种。低温精馏法每产生 $1\text{ t}$ 氧气耗电约 $260\sim 340\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,产出氧气纯度 $>99.5\%$ ;此种方式制氧投资较高,但运行成本较低,主要适用于氧气用量大、纯度高的场合。吸附分离法每产生 $1\text{ Nm}^3$ 氧气耗电约 $0.2\sim 0.3\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,产出氧气纯度约 $90\%\sim 93\%$ 。因现场制氧设备需定期停机检修,故需配备一定容量的满足停机供气要求的液氧储罐及其蒸发供气装置<sup>[2]</sup>。此种方式制氧的工程应用案例相对较少。

现场制氧气源系统一般要求纯氧含量 $\geq 90\%$ ,常压露点 $\leq -60\text{ }^\circ\text{C}$ ,杂质尺寸 $<0.1\text{ }\mu\text{m}$ ,供气压力 $\geq 0.2\text{ MPa}$ 。

## 1.2 臭氧制备及臭氧发生器冷却系统设计要点

### 1.2.1 臭氧制备系统设计要点

臭氧设备核心参数为臭氧投加量,根据不同作用而确定,且一般不设备用机。通常情况下,用于脱色时,臭氧投加量为 $2.5\sim 5\text{ mg/L}$ ;用于降解COD时,COD去除量与臭氧投加量之比一般为 $1:2\sim 1:4$ ;用于污水处理厂尾水消毒时,臭氧投加量为 $5\sim 15\text{ mg/L}$ 。

臭氧发生器核心部件为高频电流型变频器、放电管,在发生器设备选型阶段应注意如下几点:

① 每根放电管应有独立的保险丝,防止因一根放电路故障导致整个臭氧发生器停机而影响生产;

② 放电管放电间隙一般为 $0.3\sim 0.5\text{ mm}$ ,放电间隙越小,产生的热量越少,越容易冷却,发生效

率越高;

③ 进口臭氧发生器的放电器材寿命至少担保10年,发生器整机质保2年,且2年内放电管破损率不得大于0.1%;

④ 对臭氧浓度和产量应提出担保要求,验收时应进行测定,产量在10%~100%内可调<sup>[5]</sup>。

对于氧气源臭氧发生器,为提高其放电产率并保护放电管,一般在纯氧中添加1%~3%(质量分数)的氮气,即所谓“补氮”系统。补氮系统主要由无油型空压机、冷干机、干燥器等组成,由臭氧发生器厂家成套提供。

臭氧发生间内管线应敷设于管沟内或考虑架空安装,无论采用何种安装形式,均应满足相关规范,且应为检修通道留出空间。

### 1.2.2 臭氧发生器冷却系统设计要点

高温不利于臭氧的产生,而且会加速臭氧的分解,导致臭氧浓度和产量下降。冷却水主要是用来交换臭氧发生器放电管散发的热量,冷却水温度越高,臭氧系统耗电量越大。冷却水系统分为闭路循环和开路循环两种。其中,开路循环对水质要求较高,一般对氯离子含量有要求,适用于小型发生器。闭路循环中的内循环冷却水主要用于冷却放电管,应采用高纯度去离子水(电导率 $<5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ );外部冷却水通过板式换热片冷却纯水,因此对冷却水水质要求不高<sup>[3]</sup>,适用于大型发生器。对以生活污水为主的城镇污水处理厂而言,当出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A及以上时,污水厂尾水可作为外循环冷却水水源(当水温 $>35\ ^\circ\text{C}$ 时,需考虑增设冷却塔等降温设施)。内、外循环水泵流量因发生器气源不同而存在差异。

对于闭路循环冷却系统而言,板式换热器及其配套管件材质应为SS304及以上;在板式换热器选型过程中,还应着重注意换热器的传热系数、换热面积、工作压力、工作温度、处理量、人字角等参数<sup>[6]</sup>是否满足实际需求。通常,板式换热器水头损失约20~50 kPa。

## 1.3 臭氧投加及接触反应系统设计要点

### 1.3.1 臭氧投加系统设计要点

实际工况下,臭氧投加干管的设计流速一般为10~15 m/s。值得注意的是,臭氧发生器出口臭氧与氧气的混合气体压力一般为0.1 MPa,温度一般

为20~30 $^\circ\text{C}$ (与气温、冷却水温、发生器工况等有关),在计算实际工况下的管径时,需将标况下混合气体体积流量依据波义耳定律折算成实际工况下的混合气体体积流量,而后应用达西公式计算得出臭氧投加管径。

管道、管件、阀门材质均应为SS316L,设计工作压力为0.1 MPa,属于GC2级压力管道<sup>[7]</sup>;当原污水中氯离子含量较高时,臭氧接触池内臭氧投加支管管材应考虑选用双相钢等高氯离子浓度耐受型材质。臭氧投加系统的密封件应为PTFE(聚四氟乙烯)、PVDF(聚偏二氟乙烯)、全氟橡胶等耐臭氧氧化材料。臭氧管道的连接宜为焊接,焊接前应对不锈钢管道进行酸洗钝化、清洗、脱脂<sup>[4]</sup>,焊接后应对焊缝进行10%无损探伤检测,使之满足验收标准。

臭氧投加干管应敷设于管沟中,上覆活动盖板。对于气候炎热地区,管道外露部分应按相关规范进行保温,保温材料可选用PUR(聚氨酯)等,保温层厚度应通过计算确定,一般为25 mm。

### 1.3.2 臭氧接触反应系统设计要点

依据臭氧去除污染物种类的不同,臭氧与污水接触时间存在差异。用于脱色时,接触时间为10~20 min;用于降解COD时,接触时间为15~60 min(设3~6段布气区,每段接触时间为8~15 min);用于消毒时,接触时间为6~15 min,或接触3~5 min后停留10~15 min。臭氧接触池的分格、分级(段)数、每级(段)臭氧投加比、尾气破坏等均应按相关规范进行设计;竖向隔墙下部应设连通孔(方便泄空)、上部应设气压平衡孔<sup>[2]</sup>。

另外,臭氧接触池的设计要点如下:

① 应考虑设置超越接触池的流道,宜在池体内部实现超越功能<sup>[8]</sup>;

② 接触池每格均应设置独立的放空系统,以方便检修<sup>[9]</sup>;

③ 接触池最后一格反应区与出水井间应经两次折流(即增加一格缓冲室),以将臭氧反应系统与下游工艺设施间实现彻底隔离;

④ 臭氧接触池内套管应采用SS316L材质;接触池出水管道应采用SS316L,一定距离之后再采用绝缘法兰与碳钢管连接<sup>[10-11]</sup>;

⑤ 气相臭氧浓度的测定宜选择紫外吸光度仪在线监测,水中余臭氧浓度应选用隔膜电极法仪表在线监测<sup>[12]</sup>。



污水处理厂臭氧接触池宜采用微孔扩散盘释放臭氧,盘材质应为陶瓷或钛合金+SS316L不锈钢,盘径一般为120 mm或150 mm,单盘服务面积一般为 $0.6 \sim 1 \text{ m}^2$ ,单个曝气盘通量一般为 $1.5 \sim 2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ,扩散盘水头损失一般为 $5 \sim 6 \text{ kPa}$ 。接触池内进、出水闸门及放空阀门、管件材质均应采用SS316L。

## 2 臭氧处理系统的安全性设计要点

### 2.1 气源系统安全性设计要点

对以氧气或液氧为气源的臭氧制备系统,依据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014,2018年版)、《氧气站设计规范》(GB 50030—2013),同时结合污水厂的特点,有针对性地梳理气源系统的安全性设计原则,指导污水厂总图设计。

① 氧气站或液氧储罐宜靠近主要用气点位,且具有较好的通风条件。

② 液氧储罐周围严禁铺设沥青路面,5 m内禁止绿化和堆放可燃物。

③ 液氧或氧气储罐与厂外道路路边防火间距为15 m,距厂内主要道路路边间距为10 m,距厂内次要道路路边间距为5 m。

④ 液氧储罐容积不大于 $62.5 \text{ m}^3$ 或氧气储罐容积不大于 $50\,000 \text{ Nm}^3$ 时,储罐距周围民建(综合楼、宿舍等)最小防火间距要求为20 m,距耐火等级为一、二级的建筑物(臭氧发生间等)最小防火间距要求为12 m。

⑤ 储罐周围宜设栏栅,并设明显的禁火标牌,并应在储罐周围设置室外消火栓系统、移动水枪或固定水冷却设施,设计流量为 $15 \text{ L/s}$ 。此外,氧气输送管线亦应按相关规范要求进行设计,避免出现安全隐患。

### 2.2 臭氧发生间安全性设计要点

臭氧发生间火灾危险类别属于乙类<sup>[13]</sup>,宜独立建设。发生间与周围民建(综合楼、宿舍等)最小防火间距要求为25 m,与耐火等级为一、二级的厂房建筑物最小防火间距要求为10 m,且宜设置于厂区主导风向的下风向。针对地下或半地下污水厂,值得注意的是,《建筑设计防火规范》中第3.3.4条规定,臭氧发生间或含有此类功能的组合建筑,不得设置于地下或半地下。

就发生间内部防爆设计而言,依据《室外给水设计规范》(GB 50013—2006)中第9.9.19条文说明,采用氧气源的臭氧发生间内,照明灯具、开关、起

吊、通风设备需采用防爆型,臭氧发生器系统无需采用防爆型。发生间的防爆设计及发生间内电力设备的选型需严格遵照规范。

就发生间消防设计而言,《建筑设计防火规范》中第8.1.2条、《消防给水及消火栓系统技术规范》中第3.3.2条规定,发生间周围应设置室外消火栓系统,消火栓设计流量为 $15 \text{ L/s}$ ;《建筑设计防火规范》中第8.2.1条、《消防给水及消火栓系统技术规范》中第3.3.2条规定,建筑面积大于 $300 \text{ m}^2$ 的厂房和仓库应设置室内消火栓系统,消火栓设计流量为 $10 \text{ L/s}$ 。室内消火栓除起到灭火作用外,还可起到喷水稀释的作用。此外,臭氧发生间危险等级为严重危险级,火灾类型属C类或E类火灾,参考各类灭火器适用条件及一些工程实例,建议采用七氟丙烷灭火系统辅助磷酸铵盐干粉灭火器。

为避免臭氧泄漏可能造成的危害,需重视发生间内的通风换气。参考文献<sup>[14]</sup>及国内工程实例,建议臭氧发生间通风换气方式及次数为:

① 高位风机,用于工作时正常排风,换气次数取6次/h;

② 低位风机(臭氧密度大于空气),用于臭氧泄漏时排风,换气次数取12次/h。

### 2.3 臭氧接触池安全性设计要点

臭氧接触池应采用密闭式设计(进、出水闸门处覆盖热浸锌钢格栅盖板);为保留检修所必需的人孔及配套爬梯,应安装DN800或DN1000承压型法兰式人孔,材质应为SS316L。另外,为保证密闭式接触池内外压力平衡,每格臭氧接触池内至少应安装1个防爆阻火型双向呼吸阀,呼吸阀操作压力一般为 $-300 \sim 1\,800 \text{ Pa}$ ,规格多为DN100或DN150,安装数量需计算确定,安装位置一般在进水端及出水端,呼吸阀安装形式应为法兰式,材质应为SS316L。

考虑到臭氧对混凝土及池内裸露钢筋头的腐蚀作用,接触池内壁应涂刷改性聚乙烯防腐结构胶泥两层,胶层厚度建议为 $250 \mu\text{m}$ ,并养护 $8 \sim 12 \text{ h}$ ,也可采用达到同级别防腐效果的其他工艺。

尾气破坏器应装设于臭氧接触池上方的独立房间内;严禁将臭氧发生间设于臭氧接触池上方。

### 2.4 安全仪表的配置要点

出于安全生产的角度,臭氧处理系统除正常运行所需仪表外,还需设置完备的安全仪表。臭氧发

生间及臭氧接触池建议的安全仪表清单详见表 1 和 表 2。

表 1 臭氧发生间建议安全仪表配置清单

Tab.1 Safety instrument configuration list in ozone generation workshop

仪表名称	在线臭氧浓度检测仪	臭氧泄漏报警仪	氧气泄漏报警仪	涡街流量计	温度传感器	压力传感器	流量开关	温度变送器	露点仪
安装位置	臭氧发生器出气管	臭氧发生器 1 m 半径范围	臭氧发生器 1 m 半径范围	臭氧发生器出气管	出气管/出水管	出气管	出水管	外循环冷却水进、出水管	氧气进气管
注: ①除上述在线仪表外,还应配置便携式臭氧浓度检测仪;②空气源臭氧发生器无需设置氧气泄漏报警仪;③氧气泄漏报警仪、臭氧泄漏报警仪应选用分体式,表头应设于臭氧发生间室外门口处。									

表 2 臭氧接触池建议安全仪表配置清单

Tab.2 Safety instrument configuration list in ozone contact tank

仪表名称	臭氧泄漏报警仪	尾气臭氧浓度仪	排气臭氧浓度仪	余臭氧检测仪	雷达液位计
安装位置	臭氧接触池	尾气破坏进气管	尾气破坏排气管	臭氧池出水端	接触池顶
注: ①臭氧泄漏报警仪应与尾气破坏器避开一定距离;②接触池出水端应预留手动取样管(监测余臭氧)。					

3 结论

臭氧氧化工艺在混有较高比例工业废水进水的城镇污水处理厂及对出水水质要求较高的再生水厂有广泛的应用,但臭氧处理系统较之常规水处理工艺又有其明显的特殊性,在工程应用中还需注意如下几点:

- ① 对于特殊行业的难降解工业废水,臭氧接触池的停留时间与臭氧投加量均需通过试验确定。
- ② 考虑不同材料对臭氧氧化的耐受性,以保证臭氧系统运行安全性。
- ③ 考虑到氧气的易燃易爆性及臭氧的强氧化性等,对相关系统的消防及防爆设计提出了更高的要求。
- ④ 臭氧发生系统尤其是进口臭氧发生器设备制造较高,设计阶段应依据试验或经验值合理确定臭氧投加量,并结合气源系统的选择,对发生器慎重选型;设备采购阶段,除重视技术参数与设备报价外,还应注重相关核心部件的担保期,避免“买得起修不起”的尴尬局面;设备安装阶段,应严格按图施工,必要时与设计单位、设备供货厂家保持沟通;运行阶段,应总结不同运行工况下发生器的性能,寻求最优工况点,节省运行费用。

总体来讲,臭氧处理工程设计需要给水排水、材料、机械、结构、消防、电气、仪表、自控等专业密切配合,才可实现设计目的,保证系统高效、安全运行。

参考文献:

[ 1 ] 罗本福,杨曦. 城市自来水厂深度处理工艺中臭氧设计参数的取值及成本分析[J]. 水处理技术,2012,38

(12):54-56.  
Luo Benfu, Yang Xi. Design values research and cost analysis of ozone uses in city water plant deep treatment process[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38 (12):54-56(in Chinese).  
[ 2 ] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 给水排水设计手册(第3册):城镇给水[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2017.  
Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd. Manual of Water Supply and Drainage Design (Volume III): Urban Water Supply [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017(in Chinese).  
[ 3 ] 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).  
[ 4 ] 周银亮,韩冠男. 臭氧系统管道脱脂技术在再生水厂工程中的应用[J]. 市政技术,2017,35(增刊1):23-33.  
Zhou Yinliang, Han Guannan. Application of pipeline degreasing technology of ozone system in recycling water plant works [J]. Municipal Engineering Technology, 2017, 35(S1):23-33(in Chinese).  
[ 5 ] 代荣. 净水厂臭氧发生器及其相关设备的选择[J]. 城镇供水,2010(5):35-37.  
Dai Rong. Selection of ozone generator and related equipment in water treatment[J]. City and Town Water Supply, 2010(5):35-37(in Chinese).

- [6] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2002.  
Qian Songwen. Heat Exchanger Design Manual [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2002(in Chinese).
- [7] 王体明,潘莉. 大型水厂预臭氧系统的设计、安装及调试运行[J]. 城镇供水,2012(2):36-37.  
Wang Timing, Pan Li. Design, installation, commissioning and operation of pre-ozone system in large scale water plant [J]. City and Town Water Supply, 2012(2):36-37(in Chinese).
- [8] 张晏晏. 给水厂预臭氧接触池设计计算[J]. 中国给水排水,2017,33(10):74-77.  
Zhang Yanyan. Design and calculation of pre-ozonation contact tanks in waterworks [J]. China Water & Wastewater,2017,33(10):74-77(in Chinese).
- [9] 邹琳,陈睿敏,王志源. 水厂臭氧发生与投加系统运行维护分析[J]. 中国给水排水,2018,34(16):116-118.  
Zou Lin, Chen Ruimin, Wang Zhiyuan. Operation and maintenance analysis of ozone generation and dosing system in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2018,34(16):116-118(in Chinese).
- [10] 沈小红. 净水厂深度处理系统设计施工探讨[J]. 给水排水,2012,38(增刊1):192-194.  
Shen Xiaohong. Probe into design and construction problems of advanced treatment process in waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering,2012,38(S1):192-194(in Chinese).
- [11] 武琼,闫莹,周浩,等. 碳钢在臭氧中的初期腐蚀行为与机理[J]. 腐蚀与防护,2014,35(8):767-770.  
Wu Qiong, Yan Ying, Zhou Hao, et al. Initial stage corrosion behavior and mechanism of carbon steel exposed to ozone [J]. Corrosion & Protection,2014,35(8):767-770(in Chinese).
- [12] 周云,戴婕,梁小虎. 自来水厂中臭氧浓度的监控与测定[J]. 给水排水,2002,28(10):9-12.  
Zhou Yun, Dai Jie, Liang Xiaohu. The monitoring and determination of ozone concentration in waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering,2002,28(10):9-12(in Chinese).
- [13] 沈小红,蒋袁曦. 城市净水厂防火、防爆安全设计探讨[J]. 中国给水排水,2014,30(10):55-59.  
Shen Xiaohong, Jiang Yuanxi. Discussion on fire protection and explosion protection design in urban water treatment plant [J]. China Water & Wastewater,2014,30(10):55-59(in Chinese).
- [14] 尹兴蕾,高伟,龚文瑾,等. 污水处理厂中某些典型厂房的通风设计[J]. 中国给水排水,2018,34(4):56-61.  
Yin Xinglei, Gao Wei, Gong Wenjin, et al. Design of ventilation in typical factories in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018,34(4):56-61(in Chinese).



作者简介:刘巨波(1987-),男,河北唐山人,硕士,工程师,研究方向为水处理技术。

E-mail:liu2011jubo@126.com

收稿日期:2019-05-21