

运行与管理

水厂臭氧发生与投加系统运行维护分析

邹琳, 陈睿敏, 王志源

(无锡市自来水有限公司, 江苏 无锡 214073)

摘要: 以Z水厂深度处理工艺中臭氧发生与投加系统为例,详细介绍臭氧发生系统稳定运行的基本要求,对水厂臭氧系统中的几大子系统(臭氧发生器本体、氮气投加系统、冷却水系统、臭氧投加系统和尾气破坏系统)在运行过程中的常见问题进行分析,认为通过日常管理和必要的专业检查、维护和保养可以降低设备运行时的故障率,达到延长臭氧系统寿命,提高运行效能的目的。

关键词: 臭氧发生器; 冷却水系统; 曝气盘; 氮气投加; 尾气破坏

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)16-0116-07

Operation and Maintenance Analysis of Ozone Generation and Dosing System in Waterworks

ZOU Lin, CHEN Rui-min, WANG Zhi-yuan

(Wuxi Waterworks Co. Ltd., Wuxi 214073, China)

Abstract: The ozone generation and dosing system in advanced treatment process in waterworks Z was taken as an example to elaborate the basic requirements for the stable operation of ozone generation system. Common problems in the operation of several major subsystems of the ozone system were summarized and analyzed, including the ozone generator, nitrogen dosing system, cooling water system, ozone dosing system and off-gas ozone destructor. For the purpose of extending the life of the ozone system and increase its operating efficiency, measures including strengthening daily management, necessary professional inspection and maintenance were put forward to reduce the failure rate of equipment operation.

Key words: ozone generator; cooling water system; aeration diffuser; nitrogen dosing; off-gas ozone destructor

臭氧接触-生物活性炭过滤是近年来广泛使用的饮用水深度处理工艺之一,其中臭氧接触起到将水中大分子有机物分解成中、小分子有机物的作用,为后续生物炭滤池的物理吸附和生物降解奠定基础^[1,2]。因此臭氧与水的充分有效接触十分关键,臭氧接触的有效性取决于臭氧气体在设定浓度下持续稳定发生,投加、分配、曝气的均匀性。要达到以上目的,就必须保持臭氧发生与投加系统的长期稳定运行,而定期专业的维护保养是延长臭氧系统寿

命与保证运行效能必不可少的手段之一^[3~5]。以Z水厂深度处理工艺中臭氧发生与投加系统为例,详细介绍某臭氧发生器及其辅助设备的日常管理与维护保养,为其他类似水厂提供生产与设备管理经验。

1 臭氧系统介绍

1.1 稳定运行的基本要求

① 单台臭氧发生器的额定发生能力必须达到额定要求,多机联动运行时,其单台和多台的发生量均能分别满足标书要求。运行时水压、气压均正常,

无漏水、漏气现象。

② 臭氧发生器的臭氧发生效率可在一定范围内(如5%~100%)调节。根据生产运行需要,通过调整臭氧发生比率和臭氧进气流量,进行“恒定氧气流量、调节臭氧浓度”和“恒定臭氧浓度、调节氧气流量”两种方式的控制,并可灵活切换和设置,最终达到运行成本(电耗与氧耗)经济的目的。臭氧发生器内的放电管使用寿命应不少于10年^[3]。

③ 臭氧发生器及其供电单元在正常运行条件下(如外循环冷却水温为25℃,臭氧发生器达到额

定产能),其发生每kg O₃的用电量不大于10 kW·h,电流稳定无突变,内循环冷却水温<35℃。

④ 臭氧经管道输送至臭氧接触池,各池各段配气均匀,无泄漏,臭氧的利用率>95%,尾气排放臭氧浓度<0.1 mg/L,触媒使用寿命应不少于2年。

⑤ 臭氧系统周边仪表和反馈信号稳定可靠,能真实反映生产和设备运行情况^[4]。

1.2 臭氧发生与投加系统工艺流程

Z水厂臭氧发生与投加系统由气源、氮气投加、臭氧发生与投加、尾气破坏四个部分组成,见图1。

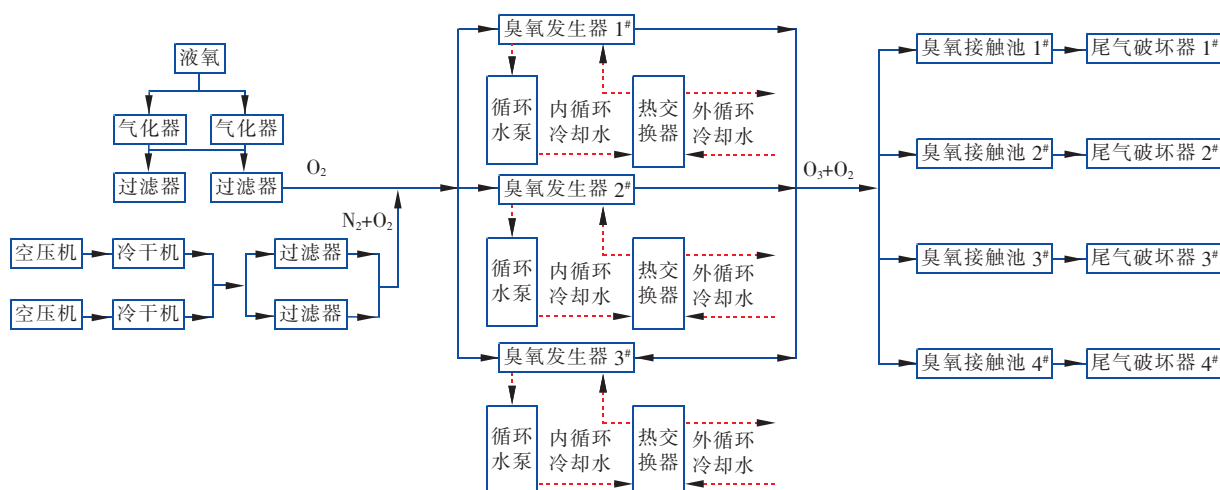


图1 Z水厂臭氧发生与投加系统工艺流程

Fig. 1 Flow chart of ozone generation and dosing system in Z waterworks

气源采用商业购买的液态纯氧,其储罐、气化器、过滤器和相应监控仪表(主要为压力表和液位仪)均为租赁;氮气投加系统由互为备用的两套无油空压机、冷干机和过滤器组成;臭氧发生器水处理能力按 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 计,最大投加量按20 mg/L设计,采用某进口品牌20 kg/h级3台,其放电管内管为高压侧,材质为不锈钢,外管为低压侧,材质为不锈钢内衬玻璃,高低压侧放电间隙为0.3 mm,每根放电管配置单独的保险丝,每台臭氧发生器配套独立的水冷却系统,闭式双面循环冷却;臭氧投加分为三级(55%、25%、20%),每级均由若干陶瓷微孔曝气盘组成;接触池内排出的尾气通过加热催化的方法进行处理,达标后排放。

臭氧发生系统电源装置的核心设备是高频电流型变频器,整套系统采用PLC程序控制,通过配置精密仪表、控制阀门和传感器来调整臭氧的发生量^[6]。

2 臭氧系统的维护保养

2.1 液氧系统

氧气有助燃性,因此液氧站的安全使用极为重要,现多数水厂液氧供应采用租赁的方式,液氧站主体设备的维护保养由供应商承担,而水厂则需要负责日常管理如人员定时定点的巡检、设备的切换使用等。

① 液氧的充装。一般液氧储罐容量需满足水厂7~10 d的使用量,液氧的充装由租赁公司承担,但因充装过程在水厂内发生,所以建议每次充装需由水厂安全员在旁监护,液氧站附近严禁明火。

② 关键数据的监控。液氧站主要监控液氧储罐的液位(30%~80%)与压力(0.5~1.4 MPa)变化,这两个数据虽与水厂自控系统以及液氧租赁公司的调度实时联网,但仍需定时核对现场数据是否与中控系统一致,以免因信号传输故障导致液氧罐液位或者压力不正常而未及时发现,造成罐内储量

不足或压力高自动泄压等情况。

③ 职工培训与应急救援。水厂需定期对职工进行设备操作、巡检要点、安全应急等方面的知识培训,并对常见突发泄漏的应急处理进行模拟演练,提高应对能力。

④ 设备维保。要求租赁公司按照规程对租赁设备进行日常保养、定期维护及大修理,每年至少1次对液氧站进行安全评价,定期校验/更换压力表与安全阀。

⑤ 液氧站的安全设备。液氧站内的安全阀、爆破片等压力安全系统以设置两套为宜,1用1备。气化器结霜为正常现象,但不可超过倒数第二排,如出现以上现象应立即切换。出气管道上的霜不可盖没液氧罐的出气阀和安全阀,若将出气阀冻结,则液氧泄漏应急处理时无法及时关闭气源;若安全阀冻结,则压力超标时无法起到安全保护作用,因此建议液氧站的两台气化器轮流切换使用,出气阀、安全阀等建议定期用高压水冲洗保持外露,方便操作。

2.2 臭氧发生系统

2.2.1 臭氧发生器

对于已购的臭氧发生器,其发生器电源、介质材料、电极材料、系统结构和电极结构等影响臭氧发生器制备效率的主要因素已经确定,而水厂则需要通过日常运行管理和定期的专业维保来延长臭氧发生器的使用寿命,稳定其制备效率。臭氧发生器因维保不到位的常见问题与解决方法:

① 放电管腐蚀

纯氧进气时会通过空压机投加一定浓度的空气(0.1%~1%),空气中的氮气作为活化成分在臭氧发生过程中起到催化作用,可以降低电耗。但同时氮气又会被臭氧氧化成白色粉末状的氮氧化物——硝酞 N_2O_5 。若是原料气体内露点温度高(一般要求 $<-60\text{ }^{\circ}\text{C}$),即水分含量高,则容易产生弧光放电,增加电耗,同时水分还会与硝酞反应生成硝酸(粘性棕色膜)等附着于高压放电管侧,堵塞放电间隙,加速电极与管道的腐蚀。

② 密封圈老化

放电管上用于隔离气、水的密封圈在臭氧发生器的臭氧侧与氧气侧均设置。臭氧侧密封圈长时间置于高浓度臭氧环境中容易老化,使密封不严,本应隔离的气水两相互通,即冷却水进入气体端,同时臭氧进入冷却水并反复参与循环,容易导致:a. 水进入

气体端,高压放电管的保险丝烧掉,对应的放电管被隔离,产率下降;b. 干燥的臭氧气体腐蚀性不强,但是潮湿的臭氧气体则具有非常强的腐蚀性,加之氮氧化物遇水形成硝酸的复杂环境,会造成更多密封圈老化泄漏,含臭氧的冷却水经循环水泵带动后会进入发生器的其他部位,如循环水泵、热交换器、不锈钢水管,仪表等,最终导致高、低压侧的放电管,甚至整个罐体均被腐蚀,危害较大。

清洗前、后的放电管见图2,老化的密封圈见图3。



图2 清洗前、后的放电管

Fig. 2 Discharge tube before and after cleaning



图3 老化的密封圈

Fig. 3 Aging seals

考虑到放电管和密封圈的重要性,臭氧发生器应每年由专业维护人员开罐检查一次,每3年专业维保一次,具体包括:a. 拆检并清洗高、低压侧放电管,其中低压侧内衬玻璃用清水反复冲洗,外侧不锈钢用草酸或柠檬酸清洗;高压侧不锈钢用草酸或柠檬酸等弱酸清洗,去除附着的各种氧化物等。b. 清洗干净的放电管需进一步检查,高压侧不锈钢表面有无腐蚀、砂眼等现象,低压侧内部烧结的玻璃是否有破损等,如有异常需及时更换。c. 更换全部密封圈。

臭氧发生器维保过程中需注意:

① 从罐体内抽出高压侧放电管时,管壁上的硝酞与空气中的水分迅速反应,生成硝酸酸雾,在此

过程中一定注意车间通风,同时要求维保人员做好相应的安全措施。

② 一般合成臭氧时的空气露点温度应在 60℃ 以下。日常使用过程中,臭氧发生器停机或重启前,一般要求吹扫 15~30 min,在臭氧发生器维保装机结束后,初次开机前需延长吹扫时间,一般需要数小时,若吹扫时间不足,则残留在放电管内的水分容易在高压放电后与氮气形成硝酸等物质,造成设备腐蚀。

③ 维保完毕重新组装启用的臭氧发生器应重新进行 INV5%~100% 放电能力的测试,用以分析维保前后臭氧发生器产率、耗用(电、氧)的变化,及时掌握臭氧发生器性能情况。

2.2.2 辅助系统

① 氮气投加系统

氮气投加系统由互为备用的两台空压机、冷干机和铝型吸附棒组成,用于保证投加的氮气洁净且水分含量低,以达到臭氧发生器的工作要求。空压机一般选用无油空压机,需定期更换空滤,检查储气罐的排水是否正常,若有污堵,应及时疏通排放;冷干机用于进一步去除进气的水分,其中自动疏水器的正常排水是关键,若有污堵应及时疏通;铝型吸附棒也用于干燥除湿,一般建议定期更换内部的氧化铝填料。

② 冷却水系统

臭氧冷却水系统的作用是带走臭氧发生器高压放电时产生的热量,使臭氧设备保持高效稳定的工作状态。一般冷却水温控制在 35℃ 以下。

a. 臭氧发生器的冷却方式。有直接冷却和间接冷却两种^[7]。直接冷却就是将水厂自用水作为冷却水,与臭氧发生器直接接触带走发生器内部热量;间接冷却就是在臭氧发生器设备中设置热交换器和闭环冷却水系统,外部冷却水体流经热交换器带走热量,一般使用水厂自用水,而闭环冷却水系统内使用去离子水以防止腐蚀设备。现多数水厂均采用间接冷却的方式,可延长臭氧发生器的寿命。

b. 冷却水系统的布置方式。有集中布置和分散布置两种。所谓集中布置是将互为备用的两组冷却循环泵、换热器和高位平衡水箱集中放置,该冷却水系统与臭氧发生器相互独立,任意一台臭氧发生器启动,冷却水系统中的任一组都联动工作,这种布置的优点是某单组冷却设备的故障不会影响臭氧发生

器的正常运行(可切换成备用);而分散布置即指每台臭氧发生器均自带一套完整的冷却水系统,冷却水系统和臭氧发生器一一对应。当臭氧发生器>2套时,其冷却设备的备用率高,但造价也高。主要缺点:当某套冷却系统故障,其对应的臭氧发生器也无法使用。不论冷却水系统采用何种布置方式,在日常使用过程中应经常切换,长时间停用后待机臭氧发生器的冷却系统对应的管道与换热器内的水会形成滞留并腐蚀设备。

c. 常见问题与解决方法。

1) 冷却水要求。如前所述,外循环冷却水采用厂区自用水,而内循环水主要带走罐体内高、低压侧放电管的热量,建议臭氧发生器初次调试或者维保过后灌水直接采用高纯度去离子水,既可减轻离子交换树脂的负荷,又可降低水体中杂质对臭氧发生器罐体的接触腐蚀。正常使用过程中要求内循环水电导率 $<5\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$,当高于此值时,臭氧发生器会报警显示异常,此时需要:Ⅰ. 校核电导率仪,判断是否因电导率仪故障引起的测定误差;Ⅱ. 如无,可更换离子交换树脂,重新对内循环水进行净化处理,观察电导率是否下降;Ⅲ. 若电导率仍下降,则直接更换内循环冷却水的方法消除异常。

2) 上位平衡水箱。主要作用为保持臭氧罐体内水的压力平衡,同时也是观察罐体内部循环水是否有漏损的直接手段,正常运行时平衡水箱的液位稳定(除开机排气外)。由蒸发引起的液位降低可直接进行去离子水补给,多发生于夏季高温时。若在运行过程中发现平衡水箱液位在短时间内有较大幅度下降,则需引起关注,一般存在几个可能性:Ⅰ. 罐体内隔离气和水的密封圈老化导致内循环水泄漏;Ⅱ. 换热器内隔离内外循环水的密封圈老化,造成内循环水流向外循环端;Ⅲ. 若现场有处理内循环水的离子交换树脂装置,还需检查此装置密封处是否出现泄漏。

3) 换热器。使用板式换热器居多。板式换热器长时间运行缺乏维保会出现的问题:Ⅰ. 导热不良、换热效果降低,这是由于外循环水水质的局限以及冷热介质温差,易在板式换热器板片表面形成积垢所致(见图4);Ⅱ. 缝隙腐蚀泄漏,这是在板式换热器密封垫片槽底或板片封闭流道的角孔垫片外侧等缝隙处,容易造成外冷却水滞留,而滞留水的电化学不均匀性所致(见图5)。视外循环水质可定期拆

检,清洗散热片和更换密封件。

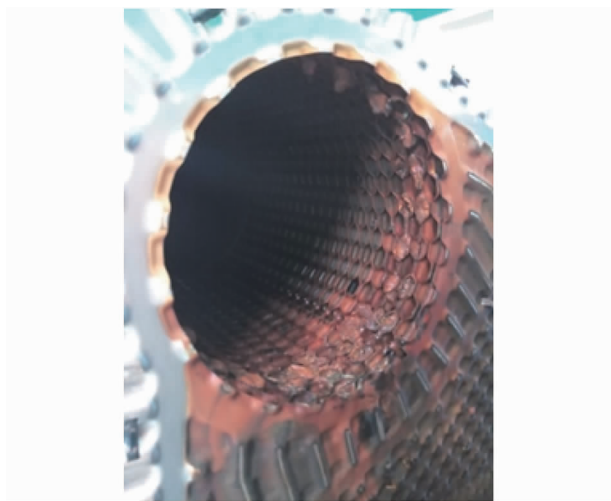


图4 换热器定期拆洗

Fig. 4 Regular heat exchanger cleaning



图5 换热器外循环端腐蚀

Fig. 5 Corrosion of external circulation heat exchanger

2.3 臭氧投加系统

臭氧投加分前臭氧和后臭氧,一般前臭氧投加采用水射器扩散方式,而后臭氧投加一般采用微孔曝气盘曝气投加。对于臭氧的投加系统,需要密切关注其配气的均匀性:设计臭氧投加配气系统时,一般按照最不利情况下的水质和水量进行,投加浓度高,所需气量大,设计管道粗。这带来的问题是:水厂在中低负荷运行且水质较好时,出现低浓度小气量的实际供气需求,此时进气压力较低,而设计进气管道都较粗,无法达到小气量时各接触池均匀分配的目的,水中曝气盘因供气压力不足而出气量小或者不出气,最后导致水中杂质颗粒等直接附着在曝气盘上,时间一长,曝气盘容易堵塞,给生产调整带

来困扰,同时因为投加气量较小,导致臭氧接触池的进气调节阀频繁调节,阀门容易损坏,降低寿命;若提高压力,增大进气量保证投加臭氧量不变,就必须将臭氧发生浓度比调低,此时必然会增加纯氧的用量,虽然设备运行稳定但不经济。

建议水厂有条件时可对臭氧接触池定期放空检查,内容包括构筑物内壁防腐涂料是否完好,是否有露筋等现象;曝气盘是否有污堵、掉落或腐蚀、密封圈变形等情况。关于曝气盘常见问题有:①曝气盘上结垢,在同级曝气盘的最后一个向下排水的最容易堵塞(见图6);②臭氧+水的环境容易对连接曝气盘与臭氧管道的丝口处进行腐蚀,严重时整个曝气盘会与布气管道脱离,造成脱落点集中曝气,其他曝气盘无气可出,这也是配气不均匀的一个主要原因(见图7);③曝气盘的不锈钢托盘与陶瓷盘相互固定的螺母容易腐蚀,造成整个曝气盘解体,同样会出现如②中所说的问题(见图8、9)。发现结垢污堵的曝气盘可及时清理或拆下浸泡除垢,换上备用盘,若出现连接处腐蚀,可去除此段丝口并重新加工。



图6 曝气盘污堵

Fig. 6 Aeration diffuser fouling



图7 曝气盘与臭氧管道连接丝口处腐蚀

Fig. 7 Connection wire mouth corrosion of aeration diffuser and ozone pipe



图 8 散落的曝气盘

Fig. 8 Scattered aeration diffusers



图 9 曝气盘内的密封圈变形

Fig. 9 Seal ring deformation in the aeration diffuser

2.4 尾气破坏系统

尾气破坏器一般安装在多级接触池的最后一级出口,经分解后的气体其臭氧排放浓度应小于 0.1 mg/L。尾气破坏器形式多样,现多使用加热触媒催化分解法,尾气收集后先经加热除湿,以防触媒受潮,接着再进行触媒的吸收分解。加热温度根据环境温度及时调整,一般冬季需调高加热管温度,夏季可适当降低加热管温度。若尾气破坏器内触媒失效需及时更换,以防排放臭氧浓度高,影响环境质量。加热装置和抽风机腐蚀情况分别见图 10、11。



图 10 加热管腐蚀

Fig. 10 Heating pipe corrosion

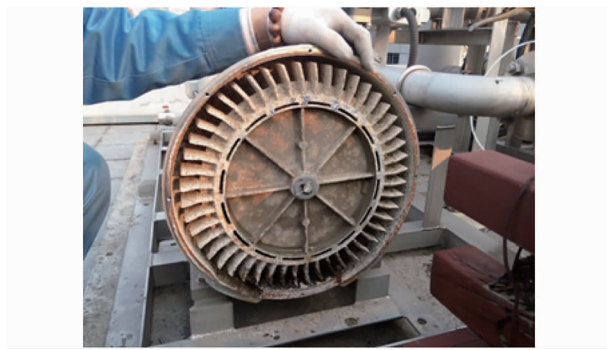


图 11 抽风机腐蚀

Fig. 11 Exhaust blower corrosion

加热装置中的加热管因加热潮湿的臭氧气体容易产生腐蚀现象;而抽风机的罩壳、内部叶片等会因臭氧气体的氧化产生较厚的氧化层,长时间不清理会 导致叶轮与罩壳卡死,使叶轮无法转动,因此应每年检查一次。抽风机内的消声器和过滤器也应定期检查更换,以防在运行过程中出现较大的噪声。

2.5 管道与阀门系统

从液氧站出口至臭氧发生器入口的管道为氧气输送管道,应独立敷设,定期检查,以防管道泄漏造成安全隐患。一般可在氧气输送管道上(主要集中在有焊接处)分段安装轻质盖板,定期用便携式氧分仪进行检测,正常情况下空气中氧气浓度为 19.5% ~ 23.5%,如某处氧气浓度过高应及时检查找出漏点并进行处理。

从臭氧发生器出口至接触池的管道内含有一定臭氧浓度的氧气,臭氧管道地面部分应置于独立管道沟内,同时登高之接触池的部分管道建议用保温材料包裹,防止夏季太阳直晒后温度迅速升高造成臭氧分解,降低臭氧的利用率,浪费原材料。臭氧管道也应定期检查,一般有液氧泄漏的管道呈棕黄色,较易辨识,如有泄漏,应立即处理。

2.6 仪表维护

臭氧发生与投加系统中涉及的仪表主要包括:臭氧浓度检测仪、流量检测仪、压力与温度计、空气露点仪、氧气泄漏报警仪。而测定臭氧浓度的在线仪表有:臭氧浓度测定仪(臭氧发生器出口)、水中余臭氧仪、空气中臭氧泄漏报警仪、尾气处理前后臭氧浓度测定仪。以上仪表直接参与设备的启停与安全保护、投加浓度的调整与控制等,因此数据的准确性和传输的及时性尤为关键,建议每年校验 1 ~ 2 次。因臭氧系统内多数仪表为进口,设备与配件的

供货周期较长,建议可备有两年以上的易损备件,以免故障时无法及时更换影响设备的正常使用。

3 结论

① 臭氧发生系统稳定运行时,额定发生能力可达到,同时主要运行参数无异常;臭氧发生效率满足生产需求;正常情况下每产生 1 kg O_3 的用电量不应大于 10 kW·h,系统的水冷却效果优良,内循环冷却水温 $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$;臭氧投加均匀,无泄漏,臭氧利用率应高于 95%;臭氧系统的配套仪表应稳定可靠。

② 水厂运行臭氧发生与投加系统时其氧气源多采用租赁的方式,但仍要注意液氧站的安全管理工作。

③ 臭氧发生器本体每 2~3 年应拆检一次,冷却系统中内循环水建议采用高纯度去离子水。

④ 建议水厂有条件的情况下,放空臭氧接触池,检查曝气盘是否有脱落、损坏等现象,并对有污垢的曝气盘进行清洗。接触池上尾气破坏系统中的触媒、加热装置和抽风机应定期检查,保证正常运行。

⑤ 氧气和臭氧管道均应定期检查其密封性以防泄漏,配套仪表每年校验 1~2 次,有条件可备两年以上的易损件。

参考文献:

- [1] 笪跃武,顾新春,胡侃,等. 水厂 O_3 -BAC 深度处理工艺系统的运行管理[J]. 中国给水排水,2013,29(18): 48-55.
Da Yuewu, Gu Xinchun, Hu Kan, et al. Discussion on management of O_3 /BAC advanced treatment process in waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(18): 48-55 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 孔令宇,张晓健,王占生. 臭氧-生物活性炭组合工艺中最佳臭氧投加剂量的确定[J]. 环境科学,2006,27

(7): 1345-1347.

Kong Lingyu, Zhang Xiaojian, Wang Zhansheng. Determination for optimal ozone dose in O_3 -BAC[J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1345-1347 (in Chinese).

- [4] 何华,方帷韬,崔磊. 臭氧发生设备在水厂的应用及其经济分析[J]. 市政技术,2014,32(5): 109-112.
He Hua, Fang Weitao, Cui Lei. Application and economic analysis of ozone generator in water supply plant[J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32(5): 109-112 (in Chinese).
- [5] CJ/T 322—2010, 水处理用臭氧发生器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
CJ/T 322-2010, Ozone Generator for Water and Waste Water Treatment[S]. Beijing: China Standard Press, 2010 (in Chinese).
- [6] 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): 35-36.
Dai Rong. Selection of ozone generator and related equipment in water treatment plant[J]. City and Town Water Supply, 2010, (5): 35-36 (in Chinese).
- [7] 朱海涛. 臭氧系统在净水处理中的应用[J]. 给水排水, 2007, 33(7): 102-105.
Zhu Haitao. The application of ozone system in water purification[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(7): 102-105 (in Chinese).



作者简介: 邹琳(1981-), 女, 江苏无锡人, 硕士, 高级工程师, 主要从事净水处理生产工艺管理与研究。

E-mail: 370084800@qq.com

收稿日期: 2018-03-12