

污水厂序批式反应池溶解氧浓度实时变化研究

李 谦¹, 杨志宏², 王 森¹, 付 佳³, 陈宏平¹

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西正阳污水净化有限公司, 山西 晋中 030600; 3. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 用溶解氧仪对某污水处理厂 SBR 池的溶解氧(DO)浓度进行了现场跟踪监测,发现曝气期间 DO 浓度变化可分为 3 个阶段,第 1 阶段 DO 浓度没有上升,但波动较大;第 2 阶段 DO 浓度稳定上升;第 3 阶段 DO 浓度接近最高值,上升非常缓慢。第 1 阶段 DO 浓度波动主要是由于 SBR 池混合不均匀、生物吸附作用导致的有机物浓度突变等因素引起的。由数据分析可知,SBR 池曝气量偏大,曝气末混合液中 DO 浓度偏高,使进入缺氧条件的时间滞后,加之后搅拌时间短,缺氧条件延续时间不足,影响了反硝化效果。为此,建议污水处理厂采用阶段曝气的方式,从曝气第 2 阶段开始,减少曝气量,以达到节能和提高处理效果的目的。另外,该污水处理厂污泥的耗氧速率(OUR)及比耗氧速率(SOUR)偏低,为解决此问题,除减少曝气量外,还应采取提高污泥负荷、及时排泥等措施。

关键词: 污水处理厂; SBR; 溶解氧浓度; 曝气

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)03-0105-06

Real-time Variation of DO Concentration in SBR of a Wastewater Treatment Plant

LI Qian¹, YANG Zhi-hong², WANG Miao¹, FU Jia³, CHEN Hong-ping¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Zhengyang Wastewater Purification Co. Ltd., Jinzhong 030600, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Onsite monitoring of DO concentration in SBR of a wastewater treatment plant (WWTP) was conducted. It was found that the aeration procedure could be divided into three periods. DO concentration did not increase during the first period, but it fluctuated violently; DO concentration increased steadily during the second period; eventually, DO concentration was close to the maximum and went up very slowly. The fluctuation of DO concentration during the first period mainly ascribed to unevenly mixing of SBR and abrupt change of organic matter concentration induced by biological absorption. It was concluded from the collected data that high aeration rate of the SBR led to too high DO concentration at the end of the aeration procedure, which prolonged the DO decreasing period before entering into anoxic condition. Moreover, the post stirring procedure was short. As a result, the anoxic condition could not be sustained and the denitrification effect was inhibited. So, stage aeration pattern was proposed to

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2014-02); 山西省人社厅留学回国人员科技活动择优资助项目(2014-95); 太原理工大学校基金资助项目(900103-03020775)

通信作者: 陈宏平 E-mail: hongpingch@163.com

save energy and improve treatment efficiency, which reduced the aeration rate from the beginning of the second aeration period. In addition, sludge OUR and SOUR of the WWTP were lower than the common value. Besides reducing the aeration rate, increasing sludge load and discharging waste sludge in time should also be applied to solve this problem.

Key words: wastewater treatment plant (WWTP); SBR; dissolved oxygen (DO) concentration; aeration

溶解氧(DO)浓度是污水生物处理系统中非常重要的一个参数,在保证系统稳定运行、节能降耗方面起到了重要的作用。姚斌等^[1]对 VACOMASS 精确曝气系统的分配与控制进行了分析,控制 DO 浓度在设定范围内,可使曝气量减少 25% ~ 50%,降低了曝气能耗,节省了运行成本。李升等^[2]在马头岗污水处理厂二期工程实施精确曝气的过程中,通过合理调节两种鼓风机的并网运行模式、优化溶解氧控制分区和仪表配置、优化溶解氧目标设定值,实现了从鼓风机供气到各个支管配气的全自动控制,生化池溶解氧得到了稳定控制,在节省大量人力的情况下稳定了出水水质。史彦伟等^[3]通过优化调控北京某污水处理厂的 DO 浓度,在保证出水水质的前提下,使其曝气电耗下降了 14.6%。

目前针对不同水处理工艺溶解氧浓度变化及其对处理效果影响的小型试验研究较多,而对实际工程中生物反应池的厌氧、缺氧、好氧段的溶解氧分布及变化过程研究较少。鉴于此,笔者采用溶解氧测定仪对某污水处理厂 SBR 池生产运行过程中的溶解氧浓度变化进行了跟踪监测,以期为污水处理厂的设计和运行管理提供參考。

1 污水厂概况及试验方法

1.1 污水厂概况

某城市污水处理厂采用传统 SBR 工艺,有 8 个独立运行的 SBR 池,单池尺寸为 34 m × 17 m × 5.5 m,有效容积为 2 700 m³,排水比为 1/3。池内配两台潜水搅拌机和一台滗水器,池底敷设微孔曝气器。SBR 池一个周期运行 8 h,时序安排如下:前搅拌 0.5 h → 曝气 3.5 h → 后搅拌 1 h → 沉淀 2 h → 排水 1 h;进水时长为 1.5 h,即进水的同时进行前搅拌,0.5 h 后前搅拌停止,开始曝气,曝气 1 h 后停止进水。

1.2 监测项目及分析方法

温度:水银温度计;pH 值:PHS-25C 型 pH 计;MLSS、MLVSS:重量法;COD:重铬酸钾法;NH₄⁺-N:纳氏试剂分光光度法;TN:过硫酸钾氧化-紫外分

光光度法;TP:钼酸盐分光光度法。

溶解氧浓度:采用溶解氧测定仪对 SBR 池一个运行周期内曝气、后搅拌及沉淀期间的溶解氧浓度变化进行定点、实时监测。由于进水前期 SBR 池内液面低,溶解氧测定仪导线长度有限,探头不能放至液面以下。因此,每个运行周期曝气期间的前 20 min 无监测数据。曝气开始 20 min 后,池内液面上升至足够的高度,开始监测溶解氧浓度。溶解氧测定仪每隔 3 min 读取一次数据,直至沉淀开始后的第 101 分钟,监测时长共计 351 min。监测期间取得 45 组数据,其中有 12 组监测时间超过了 351 min,对此 12 组数据进行分析讨论。

2 结果与讨论

监测期间,污水处理厂进水水温为 19.4 ~ 24.2 °C、pH 值为 7.31 ~ 7.92;SBR 池的 MLSS 为 3 000 ~ 4 500 mg/L(平均为 3 875 mg/L);污水厂进水口原污水的溶解氧浓度为 0.68 ~ 0.99 mg/L,平均值为 0.73 mg/L;SBR 池进水的 COD、TN、NH₄⁺-N、TP 浓度分别为 317.4 ~ 601.8、54.35 ~ 74.45、49.12 ~ 70.34、4.12 ~ 5.57 mg/L。

2.1 曝气期间 DO 浓度的变化

SBR 池每个运行周期开始曝气的时间设为零,同一监测点在不同周期内的溶解氧浓度变化过程见图 1,12 个运行周期溶解氧浓度总平均值的变化过程见图 2。从图 1、图 2 可以看出,曝气期间 SBR 池内的溶解氧浓度变化可分为 3 个阶段:第 1 个阶段为 0 ~ 110 min,该阶段溶解氧浓度不上升,围绕一个平均值上下波动,12 个运行周期的总平均值为 2.14 mg/L;第 2 个阶段为 110 ~ 180 min,溶解氧浓度直线上升,至第 180 分钟时上升至 6.69 mg/L,70 min 内上升了 4.55 mg/L,上升速度为 0.096 mg/(L · min);第 3 个阶段为 180 ~ 210 min,该阶段溶解氧浓度上升速度变缓,至第 206 分钟时达到最高值即 7.08 mg/L,在 26 min 内仅上升了 0.39 mg/L,随后略有下降。

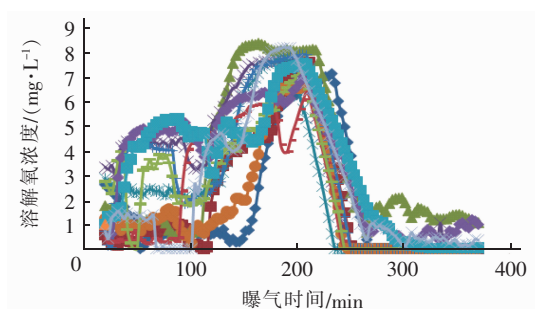


图 1 每个运行周期内曝气、后搅拌和沉淀期间的溶解氧浓度变化

Fig. 1 Change of DO concentration in aeration, post-stirring and sedimentation period of each cycle

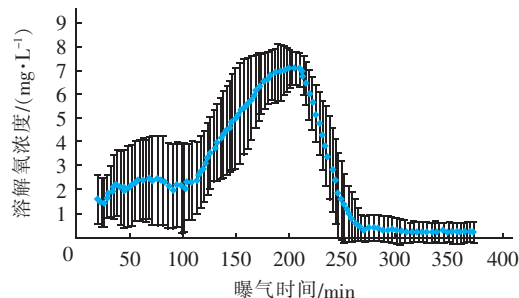


图 2 各运行周期溶解氧浓度总平均值的变化

Fig. 2 Change of DO average concentration of all cycles

2.1.1 第 1 阶段溶解氧浓度的变化

在第 1 阶段,不仅同一运行周期不同时间点的溶解氧浓度值变化较大,而且不同运行周期的溶解氧浓度平均值相差也较大。第 1 阶段不同运行周期的 DO 浓度平均值见图 3,最高为 4.14 mg/L,最低为 0.60 mg/L。在此阶段,12 个周期的 DO 浓度总体平均值最大波动幅度为 1.02 mg/L,而同一运行周期的 DO 浓度最大波动幅度达到了 4.32 mg/L。

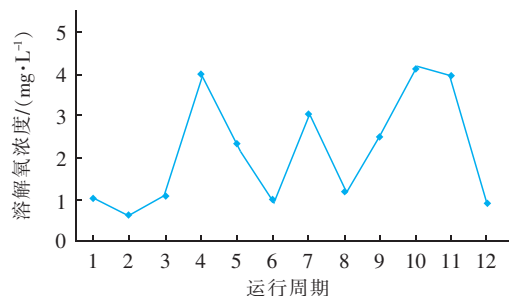


图 3 各运行周期第一阶段的溶解氧浓度平均值

Fig. 3 DO average concentration of each cycle during stage 1

引起水中溶解氧浓度变化的因素很多,如进水量、进水中的污染物种类及浓度、SBR 池内的混合程度、曝气量、水温、pH 值等。其中,每个运行周期

SBR 池的曝气量、水温、pH 值等参数相对稳定,不会造成溶解氧浓度的较大波动。曝气过程中主要进行的是有机物的降解和氨氮的硝化反应,耗氧速率与这两种污染物的浓度直接相关;曝气期间潜水搅拌机关闭,仅靠曝气的搅拌、混合作用虽能保持池内混合液的悬浮状态,但不能使池内每一点都处于均质状态;曝气头附近的混合液流至监测点就会使 DO 监测值升高,而远离曝气头的混合液流至监测点则会使 DO 监测值降低。因此,池内混合不均匀、进水水质变化以及进水变化(停止进水)等,是引起该阶段溶解氧浓度波动的主要原因。

另外,由图 2 可知,在曝气开始的第 77 ~ 110 分钟,溶解氧浓度变化曲线有一个明显的下凹段;从图 1 同样可以看到,每个运行周期在这一时间段都有一个溶解氧浓度突降的过程,说明这一现象并非偶然。由于每个运行周期下凹段开始时进水已经结束,且 SBR 池的供气量并没有发生变化,因此可以排除进水水质和水量、曝气量变化的干扰。王淑莹等^[4]认为,生物反应池混合液中溶解氧浓度与有机物浓度呈负相关,所以可以用溶解氧浓度的变化来判断混合液中有机物浓度的变化。据此推断,该时间段溶解氧浓度的下降可能是水中有机物浓度增加引起的。根据传统活性污泥理论的吸附、降解机理,活性污泥与污水混合后,会迅速吸附水中的有机物,使水中的有机物浓度降低,然后胞外水解酶将其中的大分子有机物水解为小分子有机物并重新释放到水中,导致有机物浓度上升;这部分被释放出的有机物被活性污泥降解而消耗溶解氧,从而导致了混合液中溶解氧浓度的下降。由于在进水过程中活性污泥对有机物的吸附、释放和生物降解是反复重叠和交叉进行的,所以有机物浓度波动较大,但没有明显的下降趋势。而进水停止后,活性污泥对水中的有机物进行相对集中的吸附、释放和生物降解,就导致了混合液中溶解氧浓度的突降。即进水结束后的第 17 分钟(曝气开始后的第 77 分钟),被活性污泥吸附的有机物经水解后集中释放到水中被微生物氧化降解,消耗大量的溶解氧,使得溶解氧浓度快速下降。当这部分被吸附后再次释放到水中的有机物被降解完之后,溶解氧浓度开始上升。

尽管 12 个周期第 1 阶段的溶解氧浓度平均值在 2 mg/L 以上,但从图 1 可以看出,一半以上的运行周期在这一阶段的溶解氧浓度低于 2 mg/L。对

SBR池水质变化过程的监测数据见图4,可以看出,曝气开始后的1 h内,对COD和氨氮的去除率分别为55.3%和24.6%。而这一阶段溶解氧浓度 <0.7 mg/L、COD浓度 >58 mg/L。说明在缺氧条件及COD浓度 >50 mg/L的条件下,硝化反应仍然可以进行,混合液中溶解氧和有机物的浓度不是硝化反应能否进行的关键因素。结合前期实验室小试装置运行过程中曝气头堵塞致供氧效率下降后,尽管混合液中的溶解氧浓度 >1 mg/L而硝化反应也会停止的现象,说明氧的转移速度是硝化反应能否进行的决定性因素。即如果供氧速度能够满足有机物降解和硝化反应同时进行所需要的氧量,则以上两个反应可同时进行;如果氧的转移速度小于这两个反应同时进行所需的氧量,则硝化作用首先停止而有机物降解继续进行。有机物浓度对硝化过程的影响机理有多种推断:异养菌与硝化菌竞争生存空间、有机物的存在干扰硝化菌对无机碳的吸收、异养菌同硝化菌争夺水中的溶解氧等^[5-8]。从监测结果可知,只要保证足够的供氧速度,前两个因素的影响并不明显,只有第3个因素才是抑制硝化反应的主要原因。第1阶段SBR池曝气供氧的速度与有机物降解、硝化反应的总耗氧速度相同,所以这两个反应在溶解氧浓度很低、有机物浓度相对较高的情况下可同时进行。因为供氧量与耗氧量相等,所以溶解氧浓度没有上升或下降。

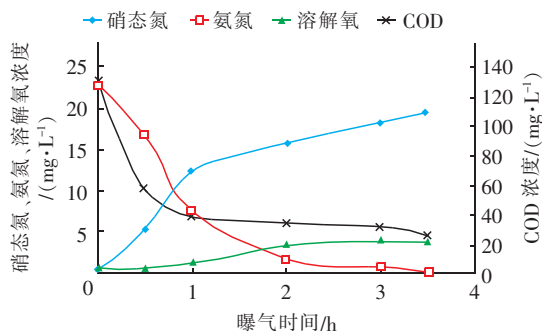


图4 硝态氮、氨氮、COD及溶解氧浓度的变化

Fig.4 Change of $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, COD and DO concentrations

2.1.2 第2阶段溶解氧浓度的变化

第2阶段,水中的有机物和氨氮浓度均已经降到比较低的水平,耗氧量低于供氧量,溶解氧浓度开始上升,上升速度为 3.74 mg/(L·h)。该阶段的前期溶解氧浓度仍有小幅波动,后期则呈直线上升。

2.1.3 第3阶段溶解氧浓度的变化

在第3阶段的开始,混合液中溶解氧浓度已经接近最高值,溶解氧浓度的增加明显变缓,180~197 min期间溶解氧浓度的上升速度为 0.02 mg/(L·min)。197~210 min为曲线的平台期,溶解氧浓度几乎不增加,这一时段12个运行周期溶解氧浓度的平均值为 7.04 mg/L。

2.2 后搅拌和沉淀期间DO浓度的变化

曝气延续至210 min后停止,进入后搅拌阶段。从图2可知,该阶段几乎每个运行周期的溶解氧浓度都沿直线下降,且溶解氧浓度下降的速率几乎一样。至曝气开始的266 min,即后搅拌56 min时,溶解氧浓度降至 0.34 mg/L,此后直到曝气开始后的第371分钟监测终止,其中沉淀进行了101 min,在这一时段内溶解氧浓度变化曲线接近水平,平均值为 0.26 mg/L。

后搅拌阶段即将结束时的第53分钟,混合液中的溶解氧浓度降到 0.50 mg/L,达到经验上的缺氧阶段,而缺氧条件仅延续了7 min即进入沉淀阶段。纯培养生物条件下,使反硝化过程停止的最小溶解氧浓度值为 0.2 mg/L。由于活性污泥絮体内存在氧浓度梯度,缺氧条件时所需DO浓度相对较高,为 $0.3 \sim 1.5$ mg/L^[9]。尽管如此,后搅拌阶段溶解氧浓度低于 1.5 mg/L的时间也仅为19 min,低于 0.5 mg/L的时间更少,只有7 min。说明该污水厂后搅拌时间设置过短,需进一步延长后搅拌时间以提高反硝化效果。从图1还可以看出,有7个运行周期在后搅拌结束时溶解氧浓度降到 0.02 mg/L以下,达到经验上的厌氧状态,具备生物除磷的条件。

由于溶解氧仪探头在水面以下20 cm左右的位置,刮风、下雨及底泥反硝化释放的气体引起的水面紊动都会干扰监测。12个运行周期中,有3个运行周期的后搅拌及沉淀阶段溶解氧浓度存在波动。

由后搅拌阶段的监测数据计算出该污水厂SBR系统污泥的耗氧速率(OUR)为 7.2 mg/(L·h),试验期间MLVSS为 1.944 g/L,则比耗氧速率(SOUR)为 3.70 mg/(g·h),远低于常见的范围即 $8 \sim 20$ mg/(g·h)^[10],说明该污水厂活性污泥负荷低或没有及时排泥。

2.3 运行中存在的问题及解决方案

2.3.1 SBR池曝气后期溶解氧浓度过高

从图4可以看出,活性污泥在溶解氧浓度 <4.2

mg/L 的情况下,已经去除了 78.7% 的有机物和 98.7% 的氨氮。赵丽君等^[11]考察了溶解氧浓度对 SBR 系统的影响,认为低溶解氧浓度时对氨氮有良好的去除效果,且随着溶解氧浓度的降低,总氮去除率呈现上升趋势。樊杰等^[12]对比研究了不同溶解氧浓度对生物除磷性能的影响,结果表明过量曝气会使除磷效率下降。以上研究均说明,过高的溶解氧浓度会使有机物分解及微生物内源代谢速率加快,污泥中的微生物营养匮乏,从而导致活性污泥老化、对污染物的去除效果不佳。据此推断,该污水厂污泥的 SOUR 值偏低,除受有机负荷低、排泥不及时致污泥老化的影响外,溶解氧浓度过高也是一个主要原因。因此,宜控制 SBR 池的溶解氧浓度在 4.2 mg/L 以下。由图 2 和图 4 可知,要达到这一目的,可采取以下措施:第一,缩短曝气时间,在曝气开始 150 min 后停止曝气,此时有机物和氨氮浓度已经降到很低的水平,再经过反硝化后有机物、氨氮和总氮浓度均可达标;第二,保持曝气时长不变,曝气 137 min 后减少曝气量,控制供氧速度与有机物降解、氨氮硝化所需的耗氧速度相等,使混合液的溶解氧浓度稳定在 4.2 mg/L 左右。前期研究结果证实,如果缩短曝气时间,长期运行则硝化效果会受到影响。因此,应采取第 2 种措施,即在保证曝气时间足够的前提下,减少后期的曝气量,这样不仅节能,而且在曝气结束时混合液中较低的溶解氧浓度更有利于后搅拌阶段尽快进入缺氧条件,提高反硝化效果。

2.3.2 曝气阶段 SBR 池内混合效果不好

由图 1 可知,由于曝气的混合、搅拌作用有限,每个周期曝气的第 1 阶段,溶解氧浓度呈跳跃式变化。这种变化有利于同步硝化反硝化、好氧反硝化等功能的实现,但同时会影响有机物的降解和氨氮的硝化功能。由于传统 SBR 池曝气阶段的主要设计目的是有机物的降解和氨氮的硝化,因此曝气的同时需进行机械搅拌,提高 SBR 池内混合液的均一性,保证该阶段的处理效果。

2.3.3 后搅拌时间短

蒋廷弘等人^[13]的研究中,针对北冲污水处理厂 A²O 工艺反硝化效果低的情况,采取了增大缺氧段容积的办法,使厌氧区、缺氧区、好氧区的体积比由 1:1:5.1 改为 1:2:4.1,提高了反硝化效率,同时也使总磷和总氮的去除率得到提高。而在本研究

中,污水厂的后搅拌时间仅为 1 h,加之 SBR 池曝气结束时混合液中溶解氧浓度偏高,使后搅拌阶段真正进入缺氧条件的时间过短,势必影响反硝化效果。因此,应在减少曝气量、降低后搅拌阶段起始溶解氧浓度的同时,延长后搅拌阶段的时间,以保证反硝化效果。

3 结论

① 通过现场监测,获得了污水处理厂 SBR 池内溶解氧浓度的实际变化过程数据,根据溶解氧浓度的变化,SBR 池曝气期间可分为 3 个阶段:第 1 阶段溶解氧浓度波动大,因供氧速度等于耗氧速度,溶解氧浓度平均值保持不变;第 2 阶段溶解氧浓度呈直线上升,且上升速度相对稳定;第 3 阶段溶解氧浓度已接近最高值,上升趋势明显变缓,溶解氧浓度变化曲线接近平台期。曝气阶段结束前,溶解氧浓度总体平均值最高为 7.08 mg/L。

② 由于曝气结束时混合液中的溶解氧浓度较高,后搅拌阶段进入缺氧条件耗时较长,缺氧条件仅延续了 7 min 即进入了沉淀阶段。因此建议该污水厂除减少曝气量外,还应适当延长后搅拌时间。

③ 该污水厂 SBR 处理系统污泥的 SOUR 值为 3.70 mg/(g·h),远低于常见的范围,这主要是过量曝气、污泥负荷偏低、排泥不及时等原因造成的,建议采取相应措施解决此问题。

参考文献:

- [1] 姚斌,杨立峰,蔡芝斌,等. 基于节能的精确曝气系统在绍兴污水厂的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(23):146-149.
- [2] 李升,胡晓东,许飞飞,等. 马头岗污水厂精确曝气系统的实施及应用效果[J]. 中国给水排水,2016,32(15):26-31.
- [3] 史彦伟,刘壮,赵有生,等. 基于溶解氧控制的 A²/O 工艺节能降耗研究[J]. 中国给水排水,2017,33(1):33-38.
- [4] 王淑莹,彭永臻,周利,等. 用溶解氧浓度作为 SBR 法过程和反应时间控制参数[J]. 中国环境科学,1998,18(5):415-418.
- [5] Zhu S, Chen S. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters[J]. Aquacult Eng, 2002, 25(1):1-11.
- [6] Kim Y M, Cho H U, Lee D S, et al. Influence of operat-

(下转第 115 页)