

马头岗污水厂精确曝气系统的实施及应用效果

李升¹, 胡晓东², 许飞飞¹, 曹莎莎¹

(1. 郑州市污水净化有限公司, 河南 郑州 450045; 2. 上海昊沧系统控制技术有限责任公司, 上海 200232)

摘要: 精确曝气系统是一种结合了基于活性污泥数学模型的需气量计算和鼓风机-阀门联调技术, 用于在污水处理过程中通过按需供、配气来稳定出水水质达标排放的解决方案。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, 制定了因地制宜的解决方案, 以应对实施过程中遇到的各种特殊情况。经过近1年的投运, 精确曝气系统运行效果稳定, 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。

关键词: 污水处理; 精确曝气; 溶解氧控制; 鼓风机并网

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2016)15-0026-06

Implementation and Application Efficiency of Aeration Volume Control System in Matougang Wastewater Treatment Plant

LI Sheng¹, HU Xiao-dong², XU Fei-fei¹, CAO Sha-sha¹

(1. Zhengzhou Sewage Purification Co. Ltd., Zhengzhou 450045, China; 2. Shanghai Haocang System Control Technology Co. Ltd., Shanghai 200232, China)

Abstract: Aeration volume control system (AVS) is a solution for the effluent quality meeting the discharge standards through air supply and distribution according to the demand during wastewater treatment, which was combined with the air demand calculation based on activated sludge model and linkage between blower and valve. During the implementation of AVS in the second-phase project of Matougang Wastewater Treatment Plant, the targeted solution was established by rationally regulating the synchronized operation of the two kinds of blowers and optimizing the division of dissolved oxygen (DO) control area, instrument configuration and dissolved oxygen target setpoint to respond to a variety of special situations encountered in the implementation process. After one year of operation, AVS had stable performance. The automatic control from blower air supply to branch air distribution was achieved. The dissolved oxygen in biological reactors was controlled steadily, and the effluent quality was stabilized in the case of saving a lot of manpower.

Key words: wastewater treatment; aeration volume control; dissolved oxygen control; blower synchronization

1 项目背景

污水处理厂鼓风曝气系统的运行直接影响曝气池的溶解氧水平, 曝气不足将导致曝气池处于低氧

状态而影响出水水质, 而曝气过量又会造成能耗浪费, 增加运行成本, 同样也可能影响出水水质。鼓风曝气系统的供、配气需根据进水水质和水量的变化

做出实时调整^[1],通过对鼓风机曝气系统气量输出和分配的合理控制,将曝气池的溶解氧控制在相对稳定的范围内,既可提高出水达标排放的稳定性,又能大量节省手动调节的人力投入。

郑州市马头岗污水处理厂总处理规模为 $60 \times$

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分两期建设运行,一期、二期工程设计规模均为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。其中二期工程采用“改良 A^2O + 混凝沉淀/过滤”工艺,具体流程见图 1,设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

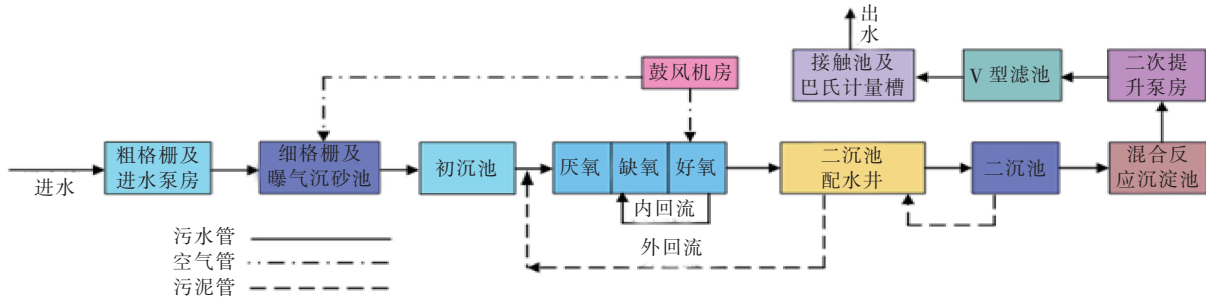


图 1 马头岗污水处理厂二期工程工艺流程

Fig. 1 Flow chart of treatment process in second-phase project of Matougang WWTP

二期工程共设置 4 座生物反应池(记为 5[#]~8[#]生物池,以区别于一期工程的 1[#]~4[#]生物池),采用多点进水 + 前置缺氧改良 A^2O 工艺,每座生物池均由预缺氧段、厌氧段、缺氧段和好氧段组成。二期工程于 2014 年 9 月建成通水,设计进水 COD 、 BOD_5 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 TN 、 TP 分别为 480、250、45、60、8 mg/L 。

为提升运营水平,建设单位决定对二期工程原有的鼓风机曝气系统进行改进,以实现自动合理供、配气。在二期工程鼓风机、空气调节阀门等设备均已完成招标采购的情况下,经过另行招投标,选择上海昊沧系统控制技术有限公司开发的 AVS 精确曝气流量控制系统作为此项改进的技术解决方案。

AVS 精确曝气流量控制系统(简称“精确曝气系统”)采用“前馈 + 模型 + 反馈”的多参数控制策略,将曝气池划分成若干溶解氧控制区(每个溶解氧控制区至少配置 1 个电动可调节阀门、1 个热式气体流量计和 1 个在线溶解氧仪表),并设置溶解氧浓度目标设定值作为控制目标。结合采集自仪表的进水水量、水质等实时数据(作为前馈信号),通过活性污泥数学模型(ASM)^[2]计算出为了维持各溶解氧控制区的溶解氧浓度设定值所需的气量;然后根据此结果,通过控制柜向鼓风机-阀门联调系统下达指令,使鼓风机按照曝气池总需气量的要求来输出气量,使阀门按照各个溶解氧控制区的需气量要求来调节开度以分配合适的气量,并以溶解氧的实际浓度作为反馈信号来进行修正,从而实现对气量的精确输配。马头岗污水处理厂二期工程于

2015 年 3 月开始实施精确曝气系统安装工作,2015 年 9 月完成试运行正式投运,至今已经连续稳定运行近 1 年,起到了降低人工操作强度、稳定工艺运行的作用。在精确曝气系统设计和实施的过程中,遇到了一些不利情况,但通过科学合理的工程措施,利用污水厂内已有的设备资源,使精确曝气系统合理整合,顺利实施并投入运行。

2 工程已有鼓风机曝气系统的特殊性

2.1 两种不同品牌鼓风机并联运行

二期工程共设置 6 台单级离心鼓风机为生物反应池供气,日常运行时 4 用 2 备,分属西门子与豪顿两个品牌,其设备信息如表 1 所示。

表 1 鼓风机设备信息

Tab. 1 Information of blasting aeration system

项 目	豪顿	西门子
数量	4	2
型号	SG45A - CVC	HV - turbo
额定功率/kW	560	600
额定电压/kV	10	10
PLC 型号	AB 1769 - L32E	西门子 S7 - 300
控制柜类型	MCP/LCP	LCP
风量调节方式	输入入口导叶调整值	输入出口导叶调整值

如何成功实现两种不同品牌鼓风机的并联运行,是精确曝气系统全自动闭环运行的关键。这就要求鼓风机系统具备 MCP 功能,从而实现鼓风机启、停以及进口/出口导叶的全自动调节。若能对两种品牌鼓风机的 MCP 程序进行整合,则困难将迎刃而解,但鼓风机厂商的程序具有较高的保密性,程序

逻辑和关键参数都有加密,因此无法通过程序的整合来实现鼓风机系统的并网运行控制。而且,2台西门子鼓风机是从一期拆除后重新安装于二期的,没有配套的MCP柜。因此需要合理优化两种鼓风机的并网运行模式。

2.2 常规的溶解氧控制分区方式不适用

马头岗二期工程创新性地采用氧化沟的完全混合式池型(实际工艺仍为 A^2O),单座生化池共设置8个好氧廊道作为曝气区,每个好氧廊道配置一根DN350的曝气支管为其供气。如果按常规方法进行溶解氧控制区划分,每座生化池需划分为8个溶解氧控制区,在每根曝气支管上安装1个电动空气调节阀和1个热式气体流量计,并在每个溶解氧控制区配置1个溶氧仪。若按上述配置方案,则精确曝气系统总共需在4座生化池上配置32个电动空气调节阀、32个热式气体流量计和32个溶氧仪,相关的采购费用将远远超过该项目的预算资金;而且由于二期工程的空气管路系统已经完成施工,期望通过优化管路设计或改造管路系统来减少仪表数量是行不通的。故应结合该污水厂的实际情况,对溶解氧控制区的划分进行优化设计以减少相应的仪表配置数量。

2.3 排放标准对DO控制提出更高要求

马头岗污水处理厂的出水直接排放到淮河的支流贾鲁河,因此出水水质的达标排放对改善淮河水水质有着重要的意义。结合淮河流域污染治理的需要,马头岗污水处理厂的出水水质除暂时执行GB 18918—2002的一级A标准外,下一步将执行贾鲁河流域水质标准,例如氨氮的达标排放标准限值将规定为3 mg/L以下,严于国家一级A标准。

相较于以追求出水水质达标为主要导向的传统曝气模式,精确曝气控制下的曝气池会处于低氧环境,导致自养硝化菌的生物活性被削弱,对氨氮的去除效果较之传统曝气模式反而可能有所下降。鉴于马头岗污水处理厂对出水氨氮浓度的排放标准特别严格,因此对生化池溶解氧的控制水平要求更高。

3 工程应对措施

3.1 两种品牌鼓风机并网控制的应对方法

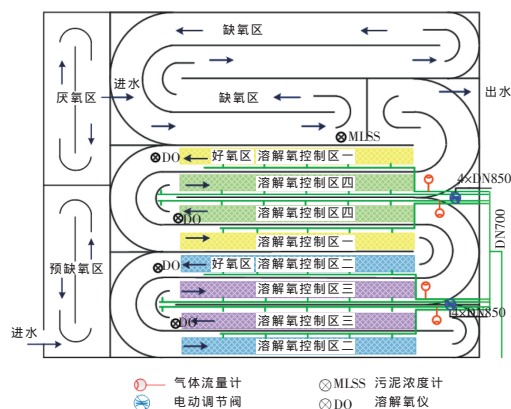
考虑到鼓风机系统运行的可靠性及安全性,最终确定二期工程6台鼓风机的调节模式为:使用1台或2台西门子鼓风机,设置为手动运行状态,即导叶开度固定,不随压力设定进行调整,系统只调整处

于自动状态的另外4台豪顿鼓风机。

由表1可知,西门子和豪顿鼓风机使用的PLC型号是不同的,而中控以及精确曝气系统使用的PLC品牌是施耐德的,与鼓风机又是不同的。为完成不同品牌PLC的内部通讯,在鼓风机系统中增加了red-lion网关(位于鼓风机主控柜内),将西门子及豪顿鼓风机的数据采集到网关,通过厂区工业环网,实现中控PLC、精确曝气PLC以及鼓风机PLC三者间的数据交互。

3.2 溶解氧控制分区与仪表配置方案的优化

为了减少热式气体流量计和溶氧仪的数量以降低仪表的采购成本,需对溶解氧控制分区进行优化设计,沿水流方向将单座生化池的8个好氧廊道划分为4个溶解氧控制区:一、二廊道为溶解氧控制区一,三、四廊道为溶解氧控制区二,五、六廊道为溶解氧控制区三,七、八廊道为溶解氧控制区四。优化后单座生化池的溶解氧控制分区以及仪表和阀门的安装示意图2。



2 优化溶解氧控制分区后的仪表阀门配置示意(单座池)

Fig. 2 Arrangement of instrument after optimizing division of DO control area

按照优化设计的方案,每根曝气支管仍安装电动空气调节阀,而只在同一个溶解氧控制区的两根曝气支管中的一根上安装热式气体流量计,并在该溶解氧控制区的中间位置安装1个溶氧仪,两根曝气支管实现空气阀的同步调节。在调试期,结合人工溶解氧仪检测数据,适当人为调整同一控制区内的两根曝气支管上的局部区域的手动阀门(单个曝气单元控制阀门),使两个廊道的溶解氧调整趋势和调整后的数值尽量保持一致。采用此种安装方式后,热式气体流量计和溶氧仪的数量可实现减半,从而在不影响系统使用效果的前提下,大大降低了

仪表的采购成本。

3.3 优化溶解氧目标设定值

为了满足马头岗污水处理厂对出水氨氮排放的严格要求,需要谨慎对待溶解氧目标设定问题。借助精确曝气系统供货商提供的 ProSee 污水厂运行专家智能决策系统这一工艺仿真工具,在对二期工程建立工艺模型的基础上,以现场的进水条件作为模型输入,在各溶解氧控制区设置不同的溶解氧目标设定值作为模型参数进行仿真,以出水氨氮达标限值为底线(暂时设置为 1 mg/L),给现场实施过程中设置溶解氧目标设定值提供参考。

为了合理配置实施精确曝气所需的溶解氧目标设定值,将实施精确曝气之前较长时间段(一个月或以上)的进水量和水质数据取均值后作为反映现场日常状况的平均进水条件(见表 2),并作为仿真的输入值,同时设置一系列溶解氧目标设定值作为仿真的运行参数来模拟实施精确曝气后的运行效果,通过出水氨氮仿真结果是否满足达标要求,来确定溶解氧目标设定值的合适范围。然后在实施过程中结合出水水质情况再逐步修正,直至达到理想的效果。这一过程其实也是精确曝气的调试阶段。

表 2 实施精确曝气前的进、出水水质

Tab. 2 Influent and effluent quality before aeration volume control $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	氨氮	总氮	总磷
进水	250	40	50	4
出水	15	0.38	13	0.1

注: 进、出水水质均以 2015 年 7 月—8 月的均值计。

二期工程的生化池前端由于好氧微生物反应剧烈,残存的溶解氧浓度不高(据现场反馈,基本在 0.5 mg/L 以下);而在生化池的中、后端,由于可供好氧微生物利用的底物大多数已经去除,溶解氧浓度升高到 1~3 mg/L。因此,可将溶解氧目标设定值按照沿生化池流程逐步升高的规则进行配置;同时将中、后端的溶解氧目标设定值设置成可变化的区间,以便通过仿真研究不同的取值组合对运行结果产生的影响。维持前端(一、二廊道)溶解氧目标设定值 DO_1 为 0.2 mg/L,后端(七、八廊道)溶解氧目标设定值 DO_4 从 1.0 mg/L 变化到 1.5 mg/L,同时中端溶解氧目标设定值 DO_2 (三、四廊道)、 DO_3 (五、六廊道)从 0.2 mg/L 变化到 0.8 mg/L。

不同溶解氧目标设定值配置下的出水氨氮仿真

结果如图 3 所示。由图 3 可以很清楚地了解在哪种组合下出水氨氮浓度会出现超标,可以为具体实施过程中设置溶解氧目标设定值提供参考。在精确曝气的具体实施中为保证出水水质达标,给出了建议溶解氧目标设定值: DO_1 为 0.2~0.5 mg/L, $\text{DO}_2 \geq 0.5$ mg/L, $\text{DO}_3 \geq 0.5$ mg/L, $\text{DO}_4 \geq 1.0$ mg/L。

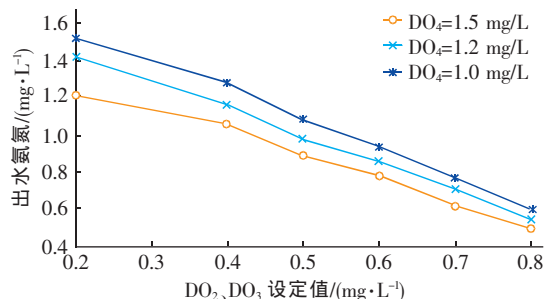


图 3 出水氨氮仿真结果随中、后端溶解氧目标设定值的变化

Fig. 3 Variation of simulated effluent NH_3-N concentration with setting DO values in middle and back of biochemical tank

考虑到现场实施和理论计算存在的差异,以及实时进水条件的不可预知性,为保险起见,应适当留有余量。在精确曝气实施中先按如下方案设置各溶解氧设定值: $\text{DO}_1 = 0.2$ mg/L, $\text{DO}_2 = 0.55$ mg/L, $\text{DO}_3 = 0.75$ mg/L, $\text{DO}_4 = 1.0$ mg/L。

4 精确曝气控制系统的应用效果

二期工程的精确曝气系统于 2015 年 9 月初实施完成并投入运行,经过近 1 年时间,运行效果稳定,实现了整个曝气系统的大闭环全自动运行,即实现了从鼓风机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,出水水质稳定达标,其中总氮和总磷的去除效果得到显著改善。

4.1 鼓风机的全自动闭环控制

精确曝气控制系统供货商成功地将两种品牌鼓风机并网运行,通过鼓风机系统的 MCP 功能实现了全自动控制鼓风机的启停和调节导叶开度来调节风量,达到了按需供气的目的,避免了进水负荷高峰时的曝气不足和进水负荷低谷时的曝气过量;同时,精确曝气控制系统内置鼓风机优化控制模块,在保证需气量的前提下,控制单台鼓风机的开启频率不超过 1 次/d,有效避免了鼓风机频繁启停对自身的影响,优化单台鼓风机的运行时间,使所有鼓风机的运行时间相一致,从而提高鼓风机的使用寿命。鼓风机系统实际输出总气量与系统设定总气量(即系统

计算的总需气量) 的对比如图 4 所示。

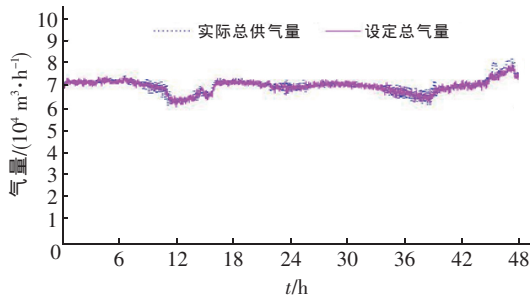


图 4 实际总供气量和设定总气量对比

Fig. 4 Comparison of actual aeration volume and setting aeration volume

通过统计分析 2015 年 9 月 20 日—22 日 48 h 内的鼓风机实际总供气量和设定总气量,实际总供气量均值为 $69\,482.1\text{ m}^3/\text{h}$,设定总气量均值为 $69\,718.97\text{ m}^3/\text{h}$,二者的绝对误差为 $236.87\text{ m}^3/\text{h}$,相对误差为 0.34% 。由此可见,鼓风机系统的总输

出气量可按精确曝气系统计算的需气量动态变化,且控制精度在 1% 以内。

4.2 溶解氧控制效果

精确曝气系统对溶解氧的控制精度主要通过稳定度^[3]来进行评价。稳定度指标是以一定时间段内在线溶解氧值在目标控制值一定范围内出现的概率来衡量的,以符号 DK_x 表示。通常情况下, x 可取 2、5、10。溶解氧控制的稳定度则需按照下列 3 个判据进行评价,分别为 DK_2 、 DK_5 、 DK_{10} ,其意义为在线溶解氧值在规定时间内出现在目标值 ± 0.2 、 ± 0.5 、 $\pm 1.0\text{ mg/L}$ 范围内的概率。其中作为样本总数的在线溶解氧值不少于 20 000 个。实际运行中溶解氧控制的稳定度标准为: $DK_2 \geq 0.30$, $DK_5 \geq 0.60$, $DK_{10} \geq 0.90$ 。

实施精确曝气后,统计分析二期工程 4 组生化池的溶解氧稳定度,结果见表 3。可知,各控制区的溶解氧控制效果均能满足定量评价标准的要求。

表 3 二期工程生化池的溶解氧稳定度统计结果

Tab. 3 DO stability of biochemical tanks in second-phase project

项 目	5 [#]			6 [#]			7 [#]			8 [#]		
	DK_2	DK_5	DK_{10}	DK_2	DK_5	DK_{10}	DK_2	DK_5	DK_{10}	DK_2	DK_5	DK_{10}
溶解氧控制区一	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95
溶解氧控制区二	≥ 0.70	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.70	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.8	≥ 0.95	≥ 0.95
溶解氧控制区三	≥ 0.75	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.4	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.6	≥ 0.95	≥ 0.95	≥ 0.7	≥ 0.95	≥ 0.95
溶解氧控制区四	≥ 0.30	≥ 0.6	≥ 0.95	≥ 0.4	≥ 0.6	≥ 0.95	≥ 0.3	≥ 0.6	≥ 0.95	≥ 0.7	≥ 0.6	≥ 0.95

实施精确曝气后,现场溶解氧控制稳定性较实施前有大幅提高。以 7[#]生化池中端的溶解氧控制区为例,在精确曝气实施前后的时间段里,各自截取 24 h 的溶解氧数据并绘制成曲线,对比分析控制效果,结果如图 5 所示。

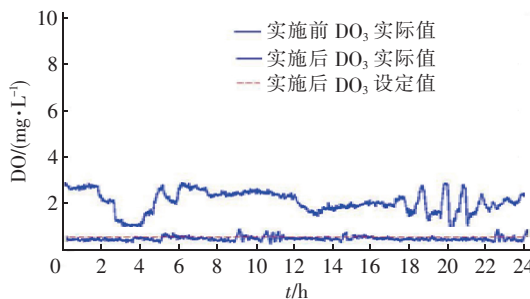


图 5 精确曝气实施前后 7[#]池中端的 DO 控制效果对比

Fig. 5 DO control effect in middle of 7[#] biochemical tank before and after aeration volume control

4.3 出水水质

统计了 2015 年 8 月 1 日—15 日(未实施精确

曝气)和 9 月 1 日—15 日(实施精确曝气后)二期工程的进、出水水质检测数据及水量数据,其中,进水各项污染物均值及进水量日均值如表 4 所示,出水各项污染物浓度日均值如表 5 所示。

表 4 精确曝气实施前后进水水质和水量对比

Tab. 4 Comparison of influent quality and quantity before and after aeration volume control

项 目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3 - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	进水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
实施前	340.3	33.4	43.9	5.5	24.2×10^4
实施后	410.3	36.5	58.3	11.6	30.2×10^4

表 5 精确曝气实施前后出水水质的变化

Tab. 5 Comparison of effluent quality before and after aeration volume control $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	氨氮	总氮	总磷
实施前	15.32	0.31	12.63	0.58
实施后	14.28	0.4	11.41	0.19

从上述对比分析结果可知,在实施精确曝气后,

虽然二期工程各项进水污染物浓度及进水量日均值较实施前均有不同程度的增加,但在精确曝气系统的支撑下,出水 COD 浓度的日均值基本同实施前持平,出水氨氮浓度的日均值较实施前有所上升但仍可达标,出水总氮、总磷浓度的日均值均较实施前有所下降,尤其是总磷浓度,其日均值的下降幅度达到 67.24%。其中,出水氨氮浓度较实施前反而有所上升的原因在于,实施精确曝气后较实施前减少了曝气量,造成氨氮未能被充分硝化。同样是这个原因,却促成了缺氧区的反硝化,导致硝态氮的去除得到加强,因此总氮去除效果得以提升。但由于马头岗污水处理厂还是以氨氮去除为首要导向,因此在接下来的实施过程中对溶解氧目标设定值的设置应优先保证出水氨氮达标。出水总磷浓度的下降可归因于,实施精确曝气后硝化菌在低氧环境下活性下降,从而促成与之存在竞争关系的聚磷菌占据一定优势,进而强化了对磷的去除。

综上,精确曝气的实施从总体上来说对出水水质达标是有正面作用的,但实施中需要对“低氧环境”下溶解氧的保持留有余量,以保证对氨氮的去除效果。

5 结论

精确曝气控制系统供货商结合马头岗污水处理厂的实际情况,解决了不同品牌鼓风机并网运行、常规的溶解氧控制分区和仪表配置方案不适用、出水排放标准更严格等问题,最终因地制宜地制定了适用于二期工程的精确曝气解决方案。

① 成功地将两种品牌鼓风机并网运行,实现了整个曝气系统的闭环全自动运行。鼓风机的实际供气量可随系统计算的需气量实时变化,且控制精度在 1% 以内。

② 实施精确曝气后,生化池溶解氧控制的稳

定性明显提升,各溶解氧控制区的溶解氧稳定度指标均达到了 $DK_2 \geq 0.30$ 、 $DK_5 \geq 0.60$ 、 $DK_{10} \geq 0.90$ 的预期要求,满足评价标准。

③ 尽管精确曝气实施期间进水污染物浓度和进水量均较实施前有所增加,但在精确曝气控制系统的支持下,仍能保证出水水质达标排放,尤其是出水总磷浓度,其日均值的下降幅度达到 67.24%。

参考文献:

- [1] 马金峰,王佳伟,张胜海,等. 污水处理厂溶解氧自动控制系统的运行优化[J]. 中国给水排水,2010,26(11):17-20.
- [2] 国际水协废水生物处理设计与运行数学模型课题组. 活性污泥数学模型[M]. 张亚雷,李咏梅译. 上海:同济大学出版社,2002.
- [3] 张荣兵,文洋,鲍海鹏,等. A^2/O 工艺 DO 的空间分布及控制品质评价指标研究[J]. 中国给水排水,2009,25(9):70-74.



作者简介:李升(1983-),男,河南南阳人,本科,设备部副部长,主要从事污水处理厂的运营管理工作。

E-mail: 251361933@qq.com

收稿日期:2016-03-21