

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.012

多级A/O工艺协同精确控制系统用于低C/N进水污水厂

王拓^{1,2}, 严冰³

(1. 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300392; 2. 天津市基础设施耐久性企业重点实验室, 天津 300392; 3. 天津大学建筑设计规划研究总院有限公司, 天津 300073)

摘要: 某市政污水处理厂整体搬迁项目总处理规模为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 设计采用预处理(含初沉池) + 多级A/O生物池 + 辐流式二沉池 + 高效澄清池 + V型滤池 + 臭氧催化氧化 + 次氯酸钠消毒工艺流程。出水需达到地表水类Ⅳ类标准。针对进水 BOD_5 低、TN 高的水质特点, 设计采用分段进水多级A/O池型作为二级处理核心工艺, 充分利用原水中 BOD_5 , 尽量降低对外加碳源的需求。采用协同精确曝气系统和精确投加碳源系统, 实现了污水厂智慧运行, 进一步降低了运营成本。与原污水厂对比, 可节省直接运行费用约 $0.39 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

关键词: 生物脱氮; 多级A/O; 低C/N

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0065-05

Application of Multi-stage A/O Process Collaborative Precise Control System in Wastewater Treatment Plant with Low C/N Influent

WANG Tuo^{1,2}, YAN Bing³

(1. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300392, China; 2. Tianjin Enterprise Key Laboratory of Infrastructure Durability, Tianjin 300392, China; 3. Tianjin University Research Institute of Architectural Design and Urban Planning Co. Ltd., Tianjin 300073, China)

Abstract: The total treatment capacity of a municipal wastewater treatment plant after overall relocation is $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. The process is designed to be “pretreatment (including primary sedimentation tank), multi-stage A/O biological tank, radial flow secondary sedimentation tank, high-efficiency clarifier tank, V-shaped filter, ozone catalytic oxidation and sodium hypochlorite disinfection”, and the effluent quality was required to meet quasi-Ⅳ surface water standards. In view of low BOD_5 and high TN of the influent quality, the step-feed multi-stage A/O tank was designed as the core process of the secondary treatment, which could make full use of BOD_5 in the raw water and reduce the demand for external carbon source as far as possible. The intelligent operation of the wastewater treatment plant was realized by adopting the collaborative precise aeration system and the precise carbon source adding system, which further reduced the operational cost. Compared with the original sewage treatment plant, the direct operational cost can be reduced by about $0.39 \text{ yuan}/\text{m}^3$ after relocation.

Key words: biological nitrogen removal; multi-stage A/O; low C/N

生物脱氮是目前污水处理效果最好、最经济的脱氮工艺,但受到进水 BOD_5 较低的影响,污水厂运行中往往要投加碳源。特别是一些大型市政污水

厂,其收水范围内覆盖部分工业废水排放,从而造成进水 C/N 值过低,需外加碳源量较多,内回流比较大。某市政污水处理厂整体搬迁项目针对上述进水

水质特点,采用分段进水多级 A/O 池型作为二级处理核心工艺,并辅以精确曝气和精确投加碳源系统,以求在出水达标前提下,降低运行成本,实现智慧控制。

1 设计进、出水水质

该污水处理厂现状处理规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水执行一级 A 标准。整体搬迁后污水处理规模为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计出水 TN、SS 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,其余指标执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类水质标准,色度 ≤ 10 倍。

本工程迁建后原收水范围不变,新纳入调水管线沿途污水,所以现状污水厂进水水质对迁建后污水厂设计进水水质的确定具有参考性。分析 2015 年 8 月—2017 年 8 月实测进水水质:进水 COD 集中在 $160 \sim 520 \text{ mg/L}$,平均值为 320 mg/L ;进水 SS 集中在 $260 \sim 720 \text{ mg/L}$,平均值为 460 mg/L ;进水 BOD_5 集中在 $80 \sim 160 \text{ mg/L}$,平均值为 113 mg/L ;进水氨氮集中在 $32 \sim 67 \text{ mg/L}$,平均值为 49 mg/L ;进水 TN 集中在 $46 \sim 77 \text{ mg/L}$,平均值为 62 mg/L ;进水 TP 集中在 $3.2 \sim 8.99 \text{ mg/L}$,平均值为 4.6 mg/L 。为保证运行正常、出水安全达标,对 COD、SS、氨氮、TN、TP 指标采用 95% 保证率取值;为保证脱氮所需碳源充足,对 BOD_5 采用 85% 保证率取值。

最终确定的设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD_5	SS	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
进水	500	150	600	60	75	8
出水	30	6	10	1.5(3)	15	0.3

2 工艺流程

污水经过初沉池处理后 BOD_5 和 TN 去除率分别为 25% 和 9.1%,考虑这一部分去除效果,进入生物池的 BOD_5 和 TN 分别为 112.5 mg/L 和 68.2 mg/L , $\text{C/N} = 1.65$,此种水质缺乏碳源,难以实现理想的脱氮效果,需投加较多的外加碳源,且内回流比较大。根据计算,为实现达标的反硝化率,需要 600% 内回流比,这不仅消耗过多电能,而且大量硝化液自好氧池回流至缺氧池,会造成缺氧池缺氧环境破坏,降低反硝化速率,还会额外消耗原水中的碳源。另一方面,对现状污水处理厂(搬迁前)碳源投

加量的分析表明,现状生化系统投加葡萄糖(50% 药液)作为外加碳源,平均投加量约 500 mg/L ,为实现出水达标,峰值投加量可达 $600 \sim 700 \text{ mg/L}$,在污水处理成本中仅碳源药剂费一项就有 $0.7 \text{ 元}/\text{m}^3$ 左右,所以生物池池型的选择尤为重要。

针对进水水质特点及出水水质要求,本工程二级处理段选用分段进水多级 A/O 工艺,其由多个串联 A/O 组成。工艺流程为预处理(含初沉池)+分段进水多级 A/O+辐流式二沉池+高效澄清池+V 型滤池+臭氧催化氧化+次氯酸钠消毒。

3 生物池设计

3.1 多级 A/O 流程

分段进水多级 A/O 工艺由多个串联 A/O 组成。回流污泥从首端进入,而污水则按一定比例从每个缺氧段进入,系统的污泥龄比相同池容的常规 A/O 工艺长。由于回流污泥分步稀释,使反应池平均污泥浓度增加,而进入二沉池的水力负荷和固体负荷均没有变化。

分段进水多级 A/O 工艺从形式上看,属于后置反硝化的范畴,且碳源均来自于污水本身,理论上不需要设置内回流。从脱氮方式上,除末端 A_n 段外,其他混合液均参与了反硝化过程,在节省能耗的同时可获得更高的反硝化率。工艺流程示意图 1。

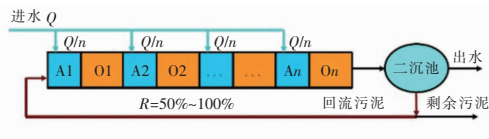


图 1 分段进水多级 A/O 流程

Fig. 1 Flow chart of step-feed multi-stage A/O process

3.2 生物池计算

生物池设计规模为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, $K_z = 1.1$ 。采用四级 A/O,每一级进水量比例为 $2:3:3:2$ 。

设计外回流污泥 $\text{MLSS} = 8\,000 \text{ mg/L}$,各级污泥浓度计算公式:

$$X_i = \frac{RX_R}{(R + \sum_{i=1}^i R_i)} \quad (i=1,2,3,4) \quad (1)$$

式中: X_R 为回流污泥浓度, mg/L ; X_i 为各级污泥浓度, mg/L ; R 为外回流比; R_i 为进水分配比例。

计算得第一、二、三、四级 A/O 池污泥浓度分别为 $6\,667$ 、 $5\,333$ 、 $4\,444$ 、 $4\,000 \text{ mg/L}$ 。

为保证出水 TN 稳定达标,设计最后一级 A/O 池出水硝态氮浓度(即外回流污泥回流至第一级缺

氧池硝态氮浓度) $N_e = 12 \text{ mg/L}$,设原水进水中不包含硝态氮,则第一级需反硝化的硝态氮浓度为 10 mg/L ,此部分硝态氮需由第一级缺氧池利用原水 BOD_5 及外加碳源通过反硝化过程全部去除。每一级反硝化速率 $K_{de} = 0.14 \text{ kgNO}_3^- - \text{N/kgBOD}_5$ 。以此为条件,计算生物池参数^[1-2],结果见表2。

表2 生物池设计参数

Tab.2 Design parameters of biological tank

项目	外加碳源量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	污泥产 率系数	水力停留 时间/h	剩余污泥量/ ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)
第一级	52.6	1.3	2.2	6 923
第二级	24.9	1.71	3.8	13 658
第三级	51.2	1.28	5.0	10 224
第四级	47.0	1.48	3.6	7 881

在第一级缺氧池前端设置厌氧池, $\text{HRT} = 1.5 \text{ h}$ 。生物池 $\text{HRT}_{\text{总}} = 16.1 \text{ h}$,气水比 $7.3:1$,设计污泥龄 15 d 。本设计总反硝化率为 82% (按计算出水 $\text{TN} = 12 \text{ mg/L}$ 计)。

对其他采用多级A/O生物池工艺的污水厂运行数据进行了分析,如天津市张贵庄污水处理厂一期工程,该工程采用四级A/O池,采用等比例进水,每段缺氧池均设置碳源投加点,但在实际运行中仅需在最后一级投加碳源,平均总反硝化率可达 80.7% ^[3]。借鉴其经验,本工程设计投加碳源点位仍为每段缺氧池。

3.3 生物池设计

共设计5个生物池系列和3个管廊。管廊内包含空气管道、进水管、外回流污泥管道、碳源投加管道。生物池平面布置及系列1和管廊1平面图见图2,系列1和系列2共用管廊1,系列3和系列4共用管廊2,系列5单独使用管廊3。

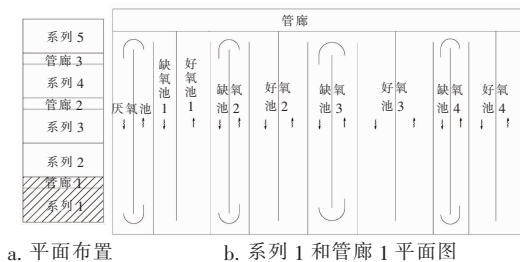


图2 生物池平面布置

Fig.2 Plane layout of biological tank

剩余污泥通过管道回流至生物池最前端,为控制每个系列回流污泥量平均分配,在管廊内设置阀门井,回流污泥管设置电磁流量计及调节型偏心半

球阀。布置示意图见图3。

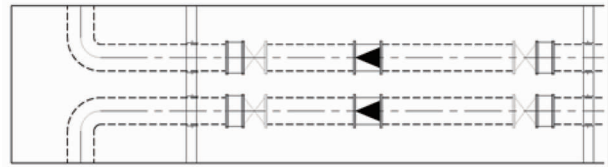


图3 外回流污泥控制

Fig.3 External return sludge control

生物池采用管道进水,每一个系列生物池每一级独立进水,进水支管设置电磁流量计和调节型偏心半球阀,以控制每一级进水量,系统图见图4。

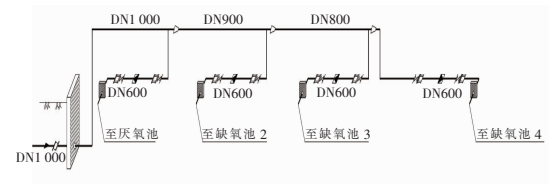


图4 进水管道控制

Fig.4 Intake pipe control

缺氧池及厌氧池采用“跑道式”布置,使单池内处于完全混流状态;好氧池采用推流式布置。单系列内设置潜水推流器8台,叶轮直径 2500 mm ;膜式微孔曝气器 5948 个,单盘曝气能力 $2.8 \sim 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

在最后一级A/O池内,设置了穿墙泵作为内回流泵,单系列设置2台,单台 $Q = 318 \text{ L/s}$ 。按照多级A/O池型原则,整体均不需要内回流。但由于最后一级好氧池出水直接进入二沉池,出于保障出水安全的目的,设置此内回流作为应急使用,平时不需开启,当进水 TN 偏高或水温偏低时,可按照 $50\% \sim 100\%$ 比例回流硝化液。

4 智慧水务设计

4.1 精确曝气系统

本工程设计鼓风机7台(6用1备),变频控制, $Q = 231 \text{ m}^3/\text{min}$,风压 72 kPa 。

生物池内好氧池共20格,每格好氧池设置独立曝气干管,整体空气管路呈“指”型布置。每根曝气干管上安装电动线性调节阀及热式气体流量计,以控制每格好氧池曝气量。

每格好氧池出水端安装溶解氧仪,量程 $0 \sim 10 \text{ mg/L}$;每格缺氧池内安装污泥浓度计,量程 $0 \sim 10 \text{ g/L}$;缺氧池系列1内安装超声波液位计,量程 8 m 。分别在鼓风机房出风母管、生物池靠近鼓风机房端

空气管、生物池远离鼓风机房端空气管安装压力变送器,量程 0~1.0 MPa。

分段进水多级 A/O 池型的特点在于缺氧池与好氧池间隔布置,省去了内回流,但对每一级好氧池出水的 DO 值也提出了更高的要求,如果好氧池出水中 $DO > 0.5 \text{ mg/L}$,将对下一级缺氧池的缺氧环境造成破坏,所以针对多级 A/O 池型,精确曝气系统是必需的。

本工程 AVS(Aeration Volume Control Sytem)的控制策略为溶解氧控制目标设定为恒定值^[4]。根据进水水质、进水量、生化池污泥浓度、生化池液位、溶解氧设定值等信号,通过鼓风机主控柜 MCP 自动控制每台鼓风机的频率,并调节各曝气支管的电动空气调节阀的开度,使需气量与供气量相吻合,从而实现生化池各控制区的实际溶解氧在该溶解氧控制目标设定值上下波动^[5]。本方案曝气过程控制系统采用“前馈补偿-多参数串级控制”策略,共包括三级串联的控制结构:第一级前馈开环控制;第二级溶解氧反馈闭环控制;第三级鼓风机闭环反馈控制。

以生物池系列 5 为例,溶解氧控制区划分、仪表及电动调节阀布置见图 5。曝气管路可实现每个系列每个区域独立控制,且降低精确曝气控制系统投入。本方案将好氧区分为 4 个控制区域。通过电动调节阀与气体流量计对各区域进行气量分配控制。

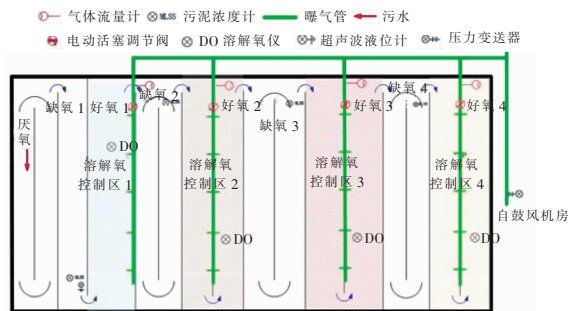


图 5 生物池溶解氧控制划分示意

Fig. 5 Schematic diagram of dissolved oxygen control in biological tank

表 3 实际进、出水水质

Tab. 3 Actual influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	氨氮	TP
进水	244~742	115~153	234	57.5~73.4	46.6~56.1	4.96~14.9
出水	12~18	0.5~1.1	4	8.1~9.4	0.1~0.8	0.06~0.16

多级 A/O 工艺在实际运行中各级进水比为 2:4:3:1~2:3:3:2,其中第二级和第四级进

4.2 精确投加碳源系统

如表 2 所示,本工程生物池每一级碳源投加量均不相同。碳源投加点位共 20 处,且碳源总体投加量较大。为避免过量投加,降低运维强度,提高运行智能水平,本工程设置了精确投加碳源系统。

碳源投加泵分为四组,以其中一组为例:第一组隔膜计量泵为生物池系列 1~系列 5 的第一级缺氧池服务,共 4 台,参数如下:

泵 A: $Q = 0.61 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 300 \text{ kPa}$, 1 台变频,出药管至管廊 3,对应生物池系列 5 的第一级缺氧池。

泵 B: $Q = 1.22 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 300 \text{ kPa}$, 2 用 1 备变频,出药管分别至管廊 1 和 2,分别对应系列 1 和系列 2、系列 3 和系列 4 的第一级缺氧池。备用泵同时可为泵 A 备用。

其余三组分别为系列 1~系列 5 的第二、三、四级缺氧池服务。

碳源投加管道位于管廊内,每一座缺氧池配置一根独立的投加管道,并安装电磁流量计及电动调节阀球阀。

每个系列生物池进水端、出水端均安装氨氮、硝氮检测仪,量程 0~100 mg/L 。

外加碳源投加控制系统,将综合考虑流入缺氧区的硝态氮浓度、出水硝态氮的目标值、进水水质和水量等参数,以活性污泥系列模型 ASM_s 为基础实时计算,并将需药量信号发送至加药泵主控柜,利用加药泵控制模块,根据泵的流量-频率特性设定泵的运行频率,调节构筑物的总加药量;同时,通过加药管路上阀门开度的调控,来实现各个构筑物加药量的合理分配,从而在实现出水水质达标的基础上,降低药剂投加量。

5 运行效果费用分析

5.1 运行效果

目前污水厂已完成设备调试,正式通水运行。由于进水中存在大比例的工业废水,部分时段 COD 和 TN 较高,但出水水质完全优于设计标准。实际进、出水水质见表 3。

水比根据实际进水水质的变化进行调整。

各级好氧池曝气量经精确曝气系统控制,大致比例为 2.4 : 3 : 3 : 1.6,运行中在线自动调节。

其中一个系列生物池各级氨氮和硝酸盐氮指标统计见表 4。

表 4 生物池各级氨氮和硝酸盐氮指标

Tab.4 Ammonia nitrogen and nitrate nitrogen indicators
of biological tank $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

位 置	氨氮	硝酸盐氮
一级缺氧前	6.14	0.497
一级缺氧后	6.45	0.336
一级好氧	4.38	1.740
二级缺氧前	9.89	0.698
二级缺氧后	7.79	0.617
二级好氧	2.33	5.81
三级缺氧前	6.28	2.07
三级缺氧后	5.31	2.55
三级好氧	0.485	6.98
四级缺氧前	1.37	7.22
四级缺氧后	0.656	7.22
四级好氧	0.429	7.66

5.2 运行费用分析

本设计可节省的运行费用包括以下几个方面:

① 采用多级 A/O 池型可省去内回流部分电耗。如采用传统 AAO 池型则所需内回流比为 600%,此部分节省电费约 $0.04 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

② 采用多级 A/O 池型可节省外加碳源。对比现状污水厂的碳源投加水平,此部分可节省药剂费约 $0.33 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

③ 采用精确曝气可降低鼓风机电耗。通过采用精确曝气系统,可节约鼓风机电耗约 15%^[3],节省电费约 $0.02 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

④ 采用精确碳源投加系统可避免碳源过量投加。此部分需平行对比现状厂内运维水平,无法精确量化,故暂不做计算。

综上所述,本设计在运行成本方面至少可节省约 $0.39 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

6 结论

某市政污水处理厂整体搬迁项目针对进水 TN 较高、掺混工业废水导致 C/N 值低的水质特点,二级处理采用分段进水多级 A/O 工艺,充分利用原水碳源,省去了内回流,提高了脱氮效率;辅以精确曝气系统和精确碳源投加系统,进一步节省了电耗及

药耗,提高了污水厂自动化水平,实现了智慧控制,可为同类污水处理厂的设计提供借鉴。

参考文献:

- [1] 周雹. 活性污泥工艺简明原理及设计计算[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
ZHOU Bao. Concise Principle and Design Calculation of Activated Sludge Process [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2005(in Chinese).
- [2] 刘长荣,李红,常建一. 分点进水多级 A/O 污水处理工艺设计计算探讨[J]. 给水排水,2011,37(1):9-13.
LIU Changrong, LI Hong, CHANG Jianyi. Discussion on the step feed multi-grade A/O wastewater treatment process design and calculation[J]. Water & Wastewater Engineering,2011,37(1):9-13(in Chinese).
- [3] 王舜和,李朦,郭淑琴. 张贵庄污水处理厂分段进水多级 AO 工艺的设计与运行[J]. 中国给水排水,2018,34(12):53-56.
WANG Shunhe, LI Meng, GUO Shuqin. Design and operation for the step-feed multi-stage AO process in Tianjin Zhangguizhuang wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater,2018,34(12):53-56(in Chinese).
- [4] 沈军. 精确曝气系统(AVS)在 AAO 工艺中的运行分析[J]. 净水技术,2016,35(5):73-78.
SHEN Jun. Operational analysis of AAO processes applied by aeration volume control system(AVS)[J]. Water Purification Technology,2016,35(5):73-78(in Chinese).
- [5] 余云龙,史彦伟,姜秀光,等. 南方某污水处理厂精确曝气技术示范及评估分析[J]. 给水排水,2017,43(2):41-44.
YU Yunlong, SHI Yanwei, JIANG Xiuguang, et al. Demonstration and evaluation of precise aeration control system for a wastewater treatment plant in south China [J]. Water & Wastewater Engineering,2017,43(2):41-44(in Chinese).

作者简介:王拓(1988-),男,天津人,硕士,高级工程师,从事污水处理工程设计工作,曾获天津市工程咨询二等奖 1 项。

E-mail:554818357@qq.com

收稿日期:2020-03-25

修回日期:2020-12-30

(编辑:孔红春)