

3AMBR 工艺处理城市污水节能降耗的中试实验

黄志伟¹, 石雷^{1,*}, 隋军², 李捷², 何晓卫¹, 周元¹, 黄焱涸¹

1. 暨南大学环境学院, 广州 510632

2. 广州市市政工程设计研究院, 广州 510060

摘要 为探索 MBR 污水厂切实可行的节能途径, 构建了处理规模为 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的 3AMBR (anoxic-anaerobic-anoxic membrane bio-reactor) 工艺中试实验系统, 以曝气量、回流比及进水方式等参数为研究对象, 优选了 4 套方案, 进行了超过 200 d 的现场实验。实验期间, 各方案出水水质良好, 优化方案的脱氮效率提高明显。当减少曝气, 使好氧池在低溶氧 ($\text{DO} < 0.3 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$) 状态下运行, 仍可保证系统出水的稳定达标排放; 提高膜池液向好氧池的回流, 使膜池的富余溶解氧得到了利用, 达到了部分或完全替代曝气的效果, 且获得了更好的脱氮能力; 多点进水 (比例为 2:2:1) 降低了系统前端的污染负荷, 合理分配了碳源, 使系统对含氮污染物等的去除能力提高, 虽然总体能耗无显著变化, 但处理能力的增强明显提升了能效。

关键词 3AMBR; 节能降耗; 多点进水; 供氧方式; 脱氮

中图分类号 X703.5 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)05-2692-07 DOI 10.12030/j.cjee.201601186

Pilot test of 3AMBR in municipal sewage treatment based on energy consumption and energy saving

HUANG Zhiwei¹, SHI Lei^{1,*}, SUI Jun², LI Jie², HE Xiaowei¹, ZHOU Yuan¹, HUANG Yaoyin¹

1. School of the Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China

2. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou 510060, China

Abstract In order to study practical methods for achieving energy savings in sewage treatment plants employing membrane bio-reactor (MBR) technology, the treatment of urban sewage in an anoxic-anaerobic-anoxic membrane bio-reactor (3AMBR) was studied in a pilot plant with a treatment capacity of $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Four typical operation processes were selected for detailed analyses of important operation conditions such as aeration, reflux ratios, and step feeding. Results showed that all of the schemes could achieve excellent water quality, and after reforming the system, the removal of nitrogen was significantly improved. By reducing the concentrations of dissolved oxygen ($\text{DO} < 0.3 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$) in the aerobic tank, this ensured the effluent standard and stability of water quality. The flow from the membrane tank to the aerobic tank was improved to make full use of the high DO in the membrane tank mixed liquor; the results showed that oxygen in the refluxed liquid could partially or completely replace the need for aeration, and this change also resulted in better removal of nitrogen. Setting up step feeding (at a ratio of 2:2:1) improved denitrification in the rear anaerobic tank. At the same time, reasonable distribution of carbon sources was achieved in line with quality requirements when the use of aeration was decreased. Energy consumption of the overall system did not change significantly with these modifications; thus, we were able to enhance the system's processing capacity while significantly increasing the energy efficiency.

Key words 3AMBR; energy saving; step feeding; aeration mode; denitrification

膜生物反应器 (membrane bio-reactor, MBR) 具有占地面积小、出水水质好、污泥产率低等优点^[1], 然而高能耗成为了 MBR 工艺在水处理领域进一步研究和应用的最大瓶颈^[2-3]。据统计, 我国城市污水处理厂

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2011ZX07317-001, 2012ZX07302-002)

收稿日期: 2016-01-25; 录用日期: 2016-04-15

第一作者: 黄志伟 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水处理技术。E-mail: dewills_huang@163.com

* 通信作者, E-mail: shilei9899@163.com

的平均电耗为 $0.29 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$,其中 MBR 工艺单位能耗是 $0.6 \sim 0.9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$,远高于传统生物处理工艺($0.2 \sim 0.3 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$),能耗水平与欧美等发达国家相比差距较大^[4-5]。特别是处理低浓度有机物废水时能耗问题尤为突出,如何找到降低能耗、物耗的途径是当前的迫切需要^[6-8]。

缺氧-厌氧-好氧膜生物反应器(anoxic-anaerobic-anoxic membrane bio-reactor,3AMBR)是具有高效脱氮除磷性能的新型 MBR 组合工艺^[9-12]。该工艺具有出水水质好、运行稳定、污泥产量小等优点,但同时系统存在运行成本过高的问题^[13]。李捷等^[14]认为,3AMBR 工艺的能耗主要来源于降低膜污染、提高脱氮除磷效果而采取的强曝气和内循环的动力消耗。

基于 3AMBR 实际运行中存在的高能耗问题,本研究开展中试实验,尝试从改变进水、曝气及内回流比的方式对 3AMBR 工艺的优化运行进行了研究,以期在无外加碳源的条件下,达到强化脱氮效率、节能降耗的目的,并研究可用于工程实际的工艺节能改造方案。

1 实验材料及方法

1.1 实验进水

中试装置搭建于昆明第四污水厂内,进水为经污水厂三道格栅处理后的生活污水和污泥脱水原液,实验期间进水水质见表 1。实验进水水质波动较大,其中 C/N(质量比)为 5.40,根据传统脱氮理论,进水碳源稍显不足,属于低 C/N 值生活污水,脱氮难度较大^[15]。

表 1 进水水质
Table 1 Influent characteristic mg · L⁻¹

项目	COD	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N
范围	31.5 ~ 394	12.78 ~ 44.69	0.31 ~ 8.85	4.77 ~ 39.72
均值	192.1	35.60	1.20	24.70

1.2 实验装置

中试装置箱体采用钢板焊接制备,设备有效容积为 $L \times W \times H = 3.9 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,设计污水处理量为 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,采用昆明第四污水处理厂现有运行工艺,工艺流程为厌氧-缺氧-好氧-变化池-膜池(图 1),该工艺对好氧池进行了分区,好氧区前段(好氧 1 段)充分利用膜池回流的 DO,可减少曝气器布置密度,后段(好氧 2 段)有机物浓度较低,减少曝气器布置密度,为后续处理单元争取更多碳源,同时可减少好氧停留时间、增加变化池停留时间,提高总氮去除效率。各池体间用开孔钢板分隔。膜组器采用帘式聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride,PVDF)中空纤维膜,膜孔径 $\leq 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ 。

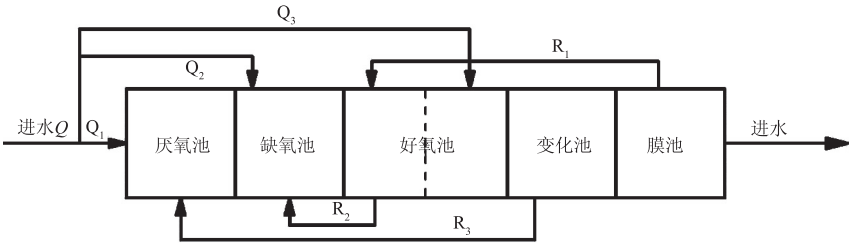


图 1 MBR 中试实验工艺流程
Fig. 1 MBR medium experiment technology flow

1.3 中试装置运行工况

中试装置的污泥龄为 15 d,膜池约为 $7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,好氧池与变化池约为 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,厌氧池与缺氧池约为 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总水力停留时间(hydraulic retention time,HRT)为 14.04 h(其中:厌氧区 1.08 h、缺氧区 7.02 h、好氧区 4.32 h、膜区 1.62 h)。该工艺设置了 3 个混合液回流:膜池至好氧池(R_1)、好氧池至缺氧池

(R_2)、变化池至厌氧池(R_3)。产水由自吸泵间歇抽吸出水,抽停时间比为 9 min/1 min,每周进行一次维护性清洗(enhanced flux maintenance,EFM)。进水量、回流量与曝气量主要通过电磁阀(2W- 250-25)、液体电磁流量计(BTLD-20016 1110)与气体流量计控制。

本研究优选了 4 套实验方案,其中方案 1 模拟昆明市第四污水处理厂处理工艺流程。其他方案与方案 1 相比,主要调整如下:方案 2,完全停止好氧池曝气,加大 R_1 回流,主要考察膜池富余溶解氧利用替代曝气的效果;方案 3,降低好氧池首段曝气量,主要考察降低曝气量的影响;方案 4,改变进水方式,考察多点进水运行工况的效果。各方案运行的具体变量对比如表 2 所示。

表 2 3AMBR 中试实验方案变量对比
Table 2 Comparison of pilot-scale 3AMBR experiment

方案	进水/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)			回流比/%			曝气量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)			好氧池搅拌
	q_1	q_2	q_3	R_1	R_2	R_3	好氧 1	好氧 2	膜池	
1	1	0	0	400	400	200	5	10	20	无
2	1	0	0	800	400	200	0	0	20	有
3	1	0	0	400	400	200	0	10	20	有
4	0.4	0.4	0.2	400	400	200	5	10	20	无

1.4 分析项目及方法

COD:《重铬酸钾法》(GB 11914-1989);TN:《过硫酸钾氧化分光光度法》(GB 11894-1989); $\text{NH}_3\text{-N}$:《氨氮的测定-纳氏试剂分光光度法》(HJ 535-2009); $\text{NO}_3\text{-N}$:《硝酸盐氮的测定-酚二磺酸分光光度法》(GB/T 7480-1989);TP:《钼锑抗分光光度法》(GB 11893-1989);DO:采用 HACH HQ-40-d 便携式溶氧仪测量;MLSS:采用 HACH TSS 便携式污泥浓度计测量;ORP:采用 HACH HQ-11-d ORP 计测量;pH:采用 HACH pH 计测量;浊度:采用 HACH 2100N 浊度仪测量。

2 结果与讨论

2.1 实验期间各方案水质结果分析

中试 MBR 系统自 2014 年 5—12 月,进行了 200 d 左右的中试实验,在去除了切换调试期后,稳定期长达 100 d(其中方案 1 为 70 d,方案 2 为 10 d,方案 3 为 10 d,方案 4 为 10 d),在此期间出水水质良好,主要水质主要指标监测结果见图 2。出水在改变运行参数后略有波动,总体来说各方案 COD 出水均低于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率可达 83.10%;出水 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 的质量浓度平均值分别 7.09、0.92 和 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率均值为 63.06%、81.59%、97.05%,优于绝大多数传统处理工艺,满足城镇污水处理厂一级 A 排放标准的要求($\text{COD} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_3\text{-N} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。各污染物除 TP 采用生物+化学法外,其余皆采用生物法去除。

2.1.1 DO 值

由表 3 监测结果可知,受节能措施的影响,各反应池水体 DO 值均出现了不同程度的改变:方案 2 虽然完全停止了曝气,但好氧 1 段仍保持了接近原来一半的 DO 水平($0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),说明膜池液回流确实起到了补充溶解氧的作用;方案 3 则停止好氧 1 曝气,该池 DO 值进一步降低到约方案 1 的 1/4 水平($0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),膜池以外的各池 DO 水平非常接近,梯度不明显;多点进水对 DO 值也产生了一定程度的影响,尤其是 2 个好氧池和变化池形成了更好的 DO 值浓度梯度。

2.1.2 有机污染物

各方案在运行期间均达到了较好的 COD 去除效果,去除率分别为 86.23%、87.47%、84.79%、89.65%。从沿程污染物浓度变化情况(图 3)可知,由于受到生化降解及回流液稀释的作用,各方案 COD 浓度在厌氧池下降幅度较大,可达到 81.28% 以上,后续处理单元对 COD 也有少量的去除作用。改变运行参数后(方案 2、方案 3 及方案 4),各单元 COD 去除率均略有下降,但与对照组相比差异并不显著,不影

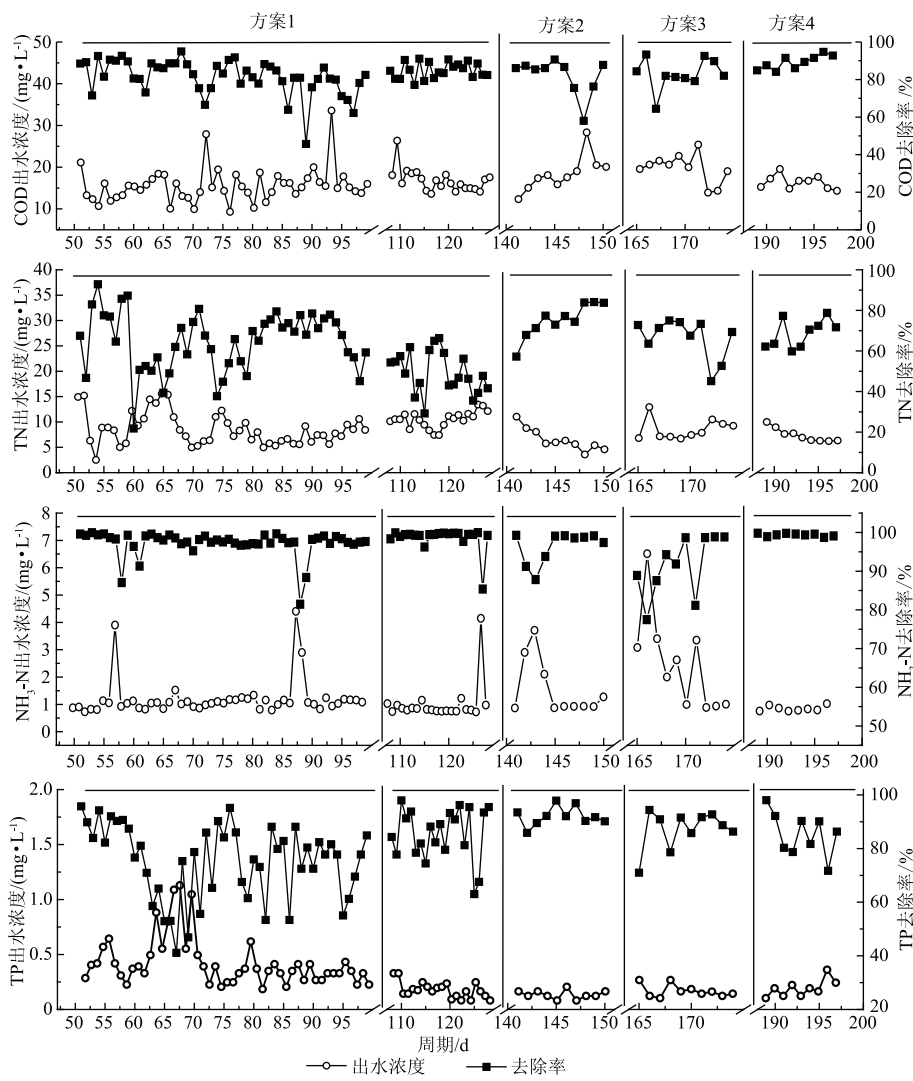


图2 3AMBR 中试出水效果

Fig.2 Treatment effect of pilot-scale 3AMBR

响出水达标(均低于 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。这表明,不同供氧方式及进水方式对 COD 处理效果的影响不大。当改变供氧方式时(方案2或方案3)好氧池溶解氧均值低于 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与厌氧池、缺氧池 DO 梯度变小,MBR 工艺中有机物的去除主要通过生化降解^[16],而该套工艺中由于膜系统的存在具有极好的泥水分离效果,污泥浓度高($5\sim8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),保证了 COD 的良好去除率。当采用多点进水时(方案4),对碳源进行了重新分配,但未见缺氧池与变化池 COD 值出现明显上升,主要原因是污泥浓度较高,有机物在反应器前段快速被消耗,而本次实验的采样点则位于处理构筑物的末端。

表3 3AMBR 中试各单元溶解氧

Table 3 DO in each tank of pilot-scale 3AMBR							$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
方案	厌氧池	缺氧	好氧 1	好氧 2	变化池	膜池	
1	0.19 ± 0.20	0.13 ± 0.17	0.51 ± 0.66	1.21 ± 1.14	0.60 ± 0.83	4.75 ± 1.42	
2	0.18 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.23 ± 0.06	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.02	5.50 ± 0.21	
3	0.16 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.12 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.08 ± 0.01	5.66 ± 0.30	
4	0.17 ± 0.04	0.14 ± 0.01	0.79 ± 0.78	0.39 ± 0.66	0.11 ± 0.13	6.16 ± 0.50	

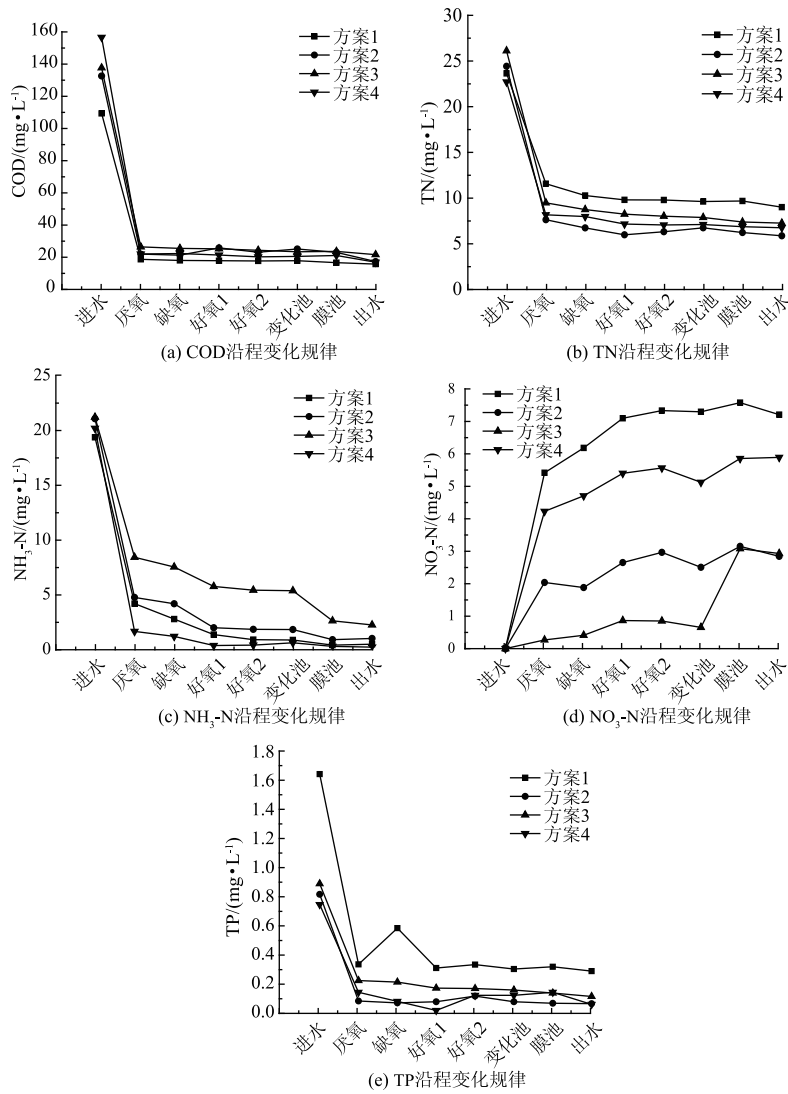


图 3 各方案工艺流程中污染物浓度的变化趋势

Fig. 3 Change trends of pollutant concentration value in process of programs

2. 1. 3 含氮污染物

TN 在各方案中均呈持续下降的趋势,这主要是系统沿程实现了同步硝化反硝化作用的结果,各方案 NH₃-N 和 NO₃-N 值沿程变化呈负相关性(图 3(c),(d)),两者之间存在明显的转化迹象,这也与国内外其他研究结果^[15-17]相似。

改造后的方案脱氮效率皆明显提高。方案 2 的污水进入系统后随着 NH₃-N 浓度的持续下降,NO₃-N 很好地稳定在 2.50 mg · L⁻¹左右,表明系统硝化/反硝化过程进行良好,其中好氧 2 段至变化池末端发生二次反硝化作用,分析原因主要是好氧 2 段与变化池中溶氧值(0.09 mg · L⁻¹)较低,反硝化菌的活性高;最低的出水 TN 出水浓度证明:增加回流较其他手段更有利于氮的去除。

方案 3 降低曝气量后,仍存在较高的 COD 和 NH₃-N 去除率,可能是存在兼型厌氧菌在低 DO 条件下利用有机碳源进行反硝化作用。但同时,NH₃-N 要高于方案 2 和方案 3,TN 去除率不高,这是因为反硝化菌活性不高,亚硝酸还原酶的合成受到抑制,导致反硝化过程中亚硝酸盐的积累,这也在孙家君等^[18]、周丹丹等^[19]的研究中也发现相似的规律。

方案 4 采用分段进水的方式,虽然变化趋势与方案 1 接近,并且也出现了较高的 NO₃-N 累积,但由于

较为均匀地分配了氮负荷与碳源,硝化/反硝化过程得以更好地进行,其中好氧 2 段至变化池末端,NO₃-N 呈现明显下降趋势,出现二次反硝化作用,但与方案 2 对比,结合溶氧值与 COD 变化趋势可知,主要是因为多点进水为处理流程末端反应池提供了充足的碳源,所以沿程各项氮素指标均优于方案 1,并最终达到了更好的脱氮效果。结果表明,多点进水可合理分配碳源,降低反应器前端负荷,从而提高脱氮效率。

2.1.4 含磷污染物

中试装置除磷采用生物法 + 化学除磷,在昆明市第四污水处理厂超细格栅之后投加铁盐(硫酸铁),由图 3(c)可知,在厌氧池末端已实现了 TP 的有效去除,出水水质均能达到 GB 18918-2002 一级 A 标的要求。由张严严等^[13]、李捷等^[14]与隋军等^[20]前期在昆明第四污水处理厂所做研究可知,生物法 + 化学除磷法即使在 COD/TP < 20 时也可达到较好的除磷效果,且方法稳定可靠。本实验中各方案除磷效果略有差别,主要是由于进水水质变化造成。

2.2 能效分析与讨论

污水处理过程中的能耗主要是指电耗,据研究其中鼓风机、泵等设备的电耗通常占到总体直接能耗的 60% ~ 90%^[2]。中试装置预处理、出水消毒系统、污泥系统的耗电量参考污水厂的耗电量,由于中试装置的曝气设备直接接自昆明市第四污水处理厂的曝气鼓风机,因此采用曝气流量占鼓风机总流量的百分比来估算耗电量。中试实验用到的其他用电设备主要有:单相潜水泵(0.75 kW,0.37 kW),离心泵(0.37 kW,仅供出水、反冲洗用),为了在相同标准下比较,这些设备均按污水厂的能耗水平分别进行了折算,具体见表 4。

表 4 MBR 中试装置各方案能耗统计表
Table 4 Energy consumption statistics of MBR medium experiment kWh · m⁻³

项目	预处理	回流	搅拌	曝气	吹扫	膜产水	消毒	污泥	汇总
污水厂	0.050	0.039	0.072	0.180	0.203	0.029	0.013	0.021	0.609
方案 1	0.050	1.250/0.074 *	2.240/0.137 *	0.342	0.370	0.370	0.013	0.021	4.656/1.377 *
方案 2	0.050	1.930/0.104 *	2.980/0.274 *	0.000	0.370	0.370	0.013	0.021	5.734/1.202 *
方案 3	0.050	1.250/0.074 *	2.610/0.183 *	0.228	0.370	0.370	0.013	0.021	4.912/1.309 *
方案 4	0.050	1.250/0.074 *	2.240/0.137 *	0.342	0.370	0.370	0.013	0.021	4.656/1.377 *

注: * 表示按污水厂搅拌、回流设备单位能耗折算的结果。

从污水厂的能耗分布看,曝气和吹扫电耗合计达 0.383 kWh · m⁻³,占全厂总电耗的 62.89%,是节能降耗的关键。受规模效应等的影响,中试装置与污水处理厂的能耗比高达 7.65(折算后为 2.26)。折算结果显示,方案 2、3 均实现了能耗的明显降低,并且保证了良好的出水水质,说明减少曝气是可行的节能途径;其中,增加回流、完全停止曝气的方案 2 获得了最低的能耗,并且表现出了最佳的脱氮能力,回流起到了代替曝气、甚至更好的效果,当然这一结论是在中试特定的条件下获得的。方案 4 采用多点进水,能耗虽基本没有变化,但优化了碳源配置,降低了好氧段首端的有机负荷,提高了脱氮效率,对出水水质有明显的改善作用,从而提高了污水处理的能效。

3 结论及建议

本研究以实际城市污水为对象,构建中试系统,进行了长达 200 余天的现场实验,结论如下:1)减少曝气是切实可行的节能途径,即使好氧池在低溶氧(DO < 0.3 mg · L⁻¹)状态下运行,仍可保证系统出水的稳定达标排放;2)增加膜池回流比,可充分利用膜池富余溶解氧,起到部分或完全替代好氧池曝气的效果,并可同时实现脱氮效能;3)多点进水在降低反应器前端污染负荷的同时,通过合理分配碳源改善了缺氧池的反硝化性能,进而提高了系统的整体处理能力,从而明显提升了能效。

本实验的 3 种优化方案都是较行之有效的节能参考,运行中的污水处理厂可采用类似方案 1 的方式,通过适当降低曝气强度达到节能;而对于新建或改造中的污水处理厂,建议设置多点进水,并辅以各单元

回流量和曝气量灵活调节的选择,以实现污水处理能效的最大化。

参考文献

- [1] 王琦,樊耀波.膜生物反应器在污水处理与回用中的能耗分析[J].膜科学与技术,2012,32(3):95-103
- [2] 朱五星,舒锦琼.城市污水处理厂能量优化策略研究[J].给水排水,2005,31(12):31-33
- [3] 杨凌波,曾思育,鞠宇平,等.我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析与定量识别[J].给水排水,2008,34(10):42-45
- [4] 梁锐.城市污水处理厂运行能耗影响因素研究[D].北京:北京交通大学,2014
- [5] 廖志民.高效低耗 4S-MBR 污水处理新技术的研发与应用[J].中国给水排水,2010,26(10):35-38
- [6] 何圣兵,蒋轶锋,王宝贞.MBR 中溶解氧和污泥负荷对污泥产量的影响[J].水处理技术,2005,31(9):17-20
- [7] 何晓卫.典型 MBR 污水处理厂能耗与节能技术研究[D].广州:暨南大学,2015
- [8] 陈宏儒.城市污水处理厂能耗评价及节能途径研究[D].西安:西安建筑科技大学,2009
- [9] 朱杰,付永胜,魏剑斌,等.MBR 技术在废水处理中的研究现状及其展望[J].污染防治技术,2003,16(4):95-98
- [10] 林丰,张林生.MBR 脱氮工艺的研究进展[J].污染防治技术,2003,16(4):42-44
- [11] KHURSHEED A, KAZMI A A. Retrospective of ecological approaches to excess sludge reduction[J]. Water Research, 2011, 45(15): 4287-4310
- [12] 董良飞,郝晓敏,余海静,等.MBR 组合工艺脱氮除磷研究进展[J].中国给水排水,2010,26(4):24-28
- [13] 张严严,郭昉,刘波,等.3AMBR 工艺在昆明第四污水处理厂的运用及运行现状分析[J].环境工程学报,2013,7(9):77-82
- [14] 李捷,隋军,马振强,等.AAOA/MBR 工艺优化运行参数研究[J].中国给水排水,2013,29(5):82-84
- [15] 凌玉成.A²O-MBR 工艺的脱氮除磷特性研究[J].环境科学与管理,2012,37(7):88-91
- [16] 王朝朝,李军,高金华,等.脱氮除磷膜生物反应器处理低 C/N 值生活污水中试[J].中国给水排水,2010,26(19):18-23
- [17] JARUSUTTHIRAK C, AMY G. Understanding soluble microbial products (SMP) a component of effluent organic matter (EfOM)[J]. Water Research, 2007, 41(12): 2787-2793
- [18] 孙家君,刘芳,胡筱敏.溶解氧和曝气时间对好氧反硝化菌脱氮效果的影响[J].环境工程,2014,32(12):62-64
- [19] 周丹丹,马放,董双石,等.溶解氧和有机碳源对同步硝化反硝化的影响[J].环境工程学报,2007,1(4):25-28
- [20] 隋军,李捷,马振强,等.AAOA/MBR 工艺处理城市污水的试验研究[J].中国给水排水,2012,28(15):21-23