

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.18.013

A^2/O 和 MBR 组合工艺在寒冷地区污水处理中的应用

王卓艺¹, 张鸿涛¹, 李东玲¹, 牛慧玲¹, 黄守斌¹, 王志强², 张涛²

(1. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084; 2. 赤峰锦源环保科技有限公司, 内蒙古 赤峰 020040)

摘要: 以内蒙古赤峰市喀喇沁旗锦山污水处理厂新建工程为例,探讨了 $A^2/O + MBR$ 组合工艺在寒冷地区的适用性以及设计经验。该工程近期处理规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用三段回流式 $A^2/O + MBR$ 组合工艺。因冬季设计水温为 9°C ,故采用应对寒冷地区的保温设计,将所有建筑物和构筑物增加框架围护结构或彩钢板进行保温。实践结果表明,在冬季运行时,保持较高的污泥浓度(缺氧池污泥浓度控制在 8 g/L 左右)和适当提高曝气量(好氧池末端 DO 控制在 4 mg/L 以上),可使出水水质指标稳定达到并优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准。

关键词: 寒冷地区; $A^2/O + MBR$; 三段回流

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)18-0070-05

Application of A^2/O and MBR Combined Process for Wastewater Treatment in Cold Area

WANG Zhuo-yi¹, ZHANG Hong-tao¹, LI Dong-ling¹, NIU Hui-ling¹, HUANG Shou-bin¹,
WANG Zhi-qiang², ZHANG Tao²

(1. Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100084, China; 2. Chifeng Jinyuan Environmental Technology Co. Ltd., Chifeng 020040, China)

Abstract: Taking the project of Jinshan wastewater treatment plant in Karaqin Banner, Chifeng City, Inner Mongolia as an example, the applicability of A^2/O and MBR combined process in cold area and the design experience were discussed. The recent treatment capacity of Jinshan wastewater treatment plant was $20\,000 \text{ m}^3/\text{d}$. Three-stage reverse-flow A^2/O and MBR combined process was adopted. The design water temperature in winter was 9°C , the thermal insulation design for cold areas was adopted. The frame enclosure structure or color steel plate were adopted to keep warm in all the buildings and structures. The results showed that when the sludge concentration was kept high (the sludge concentration in anoxic tank was controlled at about 8 g/L) and the aeration volume was increased properly (the DO at the end of aerobic tank was controlled at more than 4 mg/L), the effluent water quality could reach and superior to the first level A standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002).

Key words: cold area; $A^2/O + MBR$; three-stage reverse-flow

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105003)

北方地区冬季温度低,而传统污水生物处理工艺由于低温的影响,处理能力下降,出水不能稳定达标。膜生物反应器(MBR)工艺具有泥龄长、污泥浓度高、抗冲击负荷能力强的特点,因此更能适应低温环境;此外 MBR 较高的污泥浓度补偿了低温条件下污泥活性的下降,从而保证了出水水质的相对稳定^[1]。由此,A²/O 与 MBR 组合工艺具有出水水质好、占地面积小、剩余污泥产量低、抗冲击负荷能力强、方便操作管理等优点^[2],在寒冷地区的污水处理中具有显著优势^[3]。目前,将 MBR 工艺应用于寒冷地区污水处理的研究较多,但工程实例却不多,内蒙古赤峰市喀喇沁旗锦山污水处理厂新建工程即采用了 A²/O + MBR 组合工艺,通过对工程项目运行 1 年多的跟踪,取得了第一手的运行数据和经验,为该工艺在寒冷地区污水处理中的应用提供了实践参考。

1 项目背景

喀喇沁旗地处内蒙古自治区东部,赤峰市西南部,属中温带大陆性季风气候,春季风大干燥,夏季多雨高温,秋季霜冻较早,冬季寒冷漫长,四季分明,雨水较少。年均温 3.5 ~ 7 °C,一月份均温 -11 ~ -14 °C,极端最低温度 -30.9 °C。

喀喇沁旗锦山污水处理厂服务对象为锦山镇城区。原有锦山污水处理厂设计规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用生物吸附 + 人工湿地处理工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)二级标准。随着城区北扩,原有污水厂处于城区北部的核心区域,占地面积大,且冬季的处理效果也可能较难保证,综合考虑其对周围环境影响和对处理效果要求的不断提高,将该厂迁至城区北部牛头沟门村西南侧,占地 4.2 hm²。

喀喇沁旗锦山污水处理厂新建工程近期处理规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,远期处理规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。厂内粗格栅和提升泵房、污泥脱水间和附属建筑物土建按远期规模设计,其他构筑物土建按近期规模设计;所有设备均按近期规模设计。

2 设计进、出水水质和工艺流程

2.1 设计进、出水水质

本工程设计进水水质根据原有污水处理厂实测进水水质并结合污染物产生系数法计算,同时参考本地区同类项目,并考虑一定的安全余量综合确定。污水厂出水用作道路浇洒、绿化用水以及热电厂冷

却水等,当由于季节等原因中水需求量减小时,污水厂出水排放至锡伯河。根据排放水体的功能划分及当地环保部门的要求,工程设计出水标准执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 标准。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

mg · L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ - N	TN	TP
设计进水	430	190	300	40	55	6
设计出水	50	10	10	5(8)	15	0.5

2.2 工艺流程

污水处理厂设计工艺流程如图 1 所示。

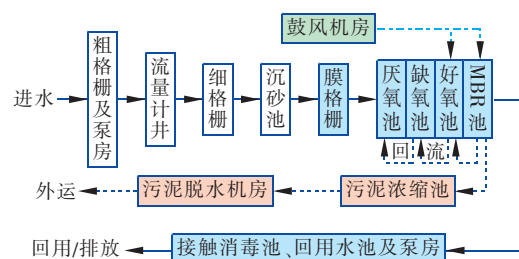


图 1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

污水由排水管网收集进入污水处理厂,流经粗格栅及提升泵房后提升进入细格栅和曝气沉砂池。在进入生化池前设置精细格栅,以保护膜处理单元。

经过预处理设施后的污水进入 A²/O + MBR 组合生化池,组合生化池包括 A²/O 池(厌氧池、缺氧池、好氧池)和 MBR 池,在此进行有机污染物的降解,氮、磷等污染物的去除。该系统有三段回流:缺氧池混合液通过泵回流至厌氧池,与厌氧池进水混合;好氧池混合液通过泵回流至缺氧池,与厌氧池出水混合;MBR 池的回流污泥通过泵回流到好氧池,与缺氧池出水混合。膜过滤出水经过次氯酸钠消毒后回用或排放。

生化池的剩余污泥浓缩后送污泥脱水系统脱水至含水率为 60%,外运进行卫生填埋处置。

3 工程设计

3.1 预处理区

① 粗格栅和污水提升泵房

粗格栅间和污水提升泵房合建,粗格栅渠 2 组,单渠宽度为 1.0 m,粗格栅采用回转式格栅,栅隙为 20 mm,格栅安装角度为 65°,栅前水深为 1 m。

② 细格栅、曝气沉砂池和膜格栅渠

细格栅渠、曝气沉砂池与膜格栅渠合建。细格栅渠两组,单渠宽为1.2 m,细格栅2台(1用1备),采用回转式格栅,栅隙为2 mm,格栅安装角度为60°,栅前水深为1.5 m。曝气沉砂池2座,有效水深为2.1 m,设计停留时间为7.3 min,设置单槽桥式排砂机和砂水分离器各一台,经分离后的沉砂外运,曝气风管来自鼓风机房。膜格栅渠2组,单渠宽为1.6 m,膜格栅2台(1用1备),采用栅条间隙为1 mm的内进流式网板膜格栅,栅前水深为2 m。设置高排水螺旋压榨机1台。

3.2 A²/O + MBR 生化组合池

① A²/O 池

A²/O池由厌氧池、缺氧池和好氧池组成。设计2组,并联运行。

厌氧池停留时间为1.5 h,污泥浓度为4.5 g/L,缺氧池回流至厌氧池的混合液回流比为200%。

缺氧池设计温度采用9℃,反硝化速率为0.026 kgNO₃⁻-N/(kgMLSS·d),缺氧池停留时间为4.6 h,污泥浓度为6.7 g/L,好氧池回流至缺氧池的混合液回流比为400%。

好氧池设计温度采用9℃,硝化菌比生长速率为0.218 d⁻¹,好氧池设计污泥龄为13.5 d,停留时间为4.2 h,污泥浓度为8.3 g/L,膜池回流至好氧池的污泥回流比为500%。好氧池供气量为88 m³/min,气水比为6.3:1。

② MBR 池

MBR池共4组,并联运行,MBR池停留时间为1.1 h。每组膜池安装4组膜箱,并预留2组膜箱的备用空位,采用PVDF中空纤维带衬膜,设计通量为16.5 L/(m²·h),设计污泥浓度为10 g/L,膜吹扫风量为116 m³/min,气水比为8.4:1。化学除磷剂采用PAC,投加于MBR池进水管。

为防止膜淤堵,MBR池运行时采用3种方式:产水泵运行7 min,停1 min;平均一周至半个月在线反洗一次(一次15~30 min,采用水洗+NaClO反洗);半年至一年离线清洗一次(将膜箱吊至离线清洗池,采用水洗+柠檬酸酸洗+NaClO碱洗)。

好氧(好氧池+MBR池)污泥负荷为0.099 kgBOD₅/(kgMLSS·d)。

③ 膜设备间

膜设备间设有产水泵、CIP(在线清洗)泵、剩余

污泥泵、真空泵等生产设备以及次氯酸钠、柠檬酸和PAC等药剂储存和投加设备。

3.3 消毒接触池、回用水池和泵房

消毒接触池、回用水池和泵房合建。接触消毒池停留时间为0.5 h,采用NaClO消毒,MBR出水消毒后通过出水堰排放,回用时将消毒接触池和回用水池间的闸门打开,回用水池停留时间为2.1 h。

3.4 污泥浓缩池和污泥脱水机房

剩余生化污泥进入污泥浓缩池,采用重力浓缩的方式,浓缩池上清液回到系统前端的提升泵房。剩余污泥量为3335 kg/d(绝干污泥),污泥固体负荷为42.5 kg/(m²·d)。污泥浓缩后经过石灰调理进入厢式自动隔膜压滤机,脱水至含水率达60%以下外运。

4 工程设计特点

① 合理确定设计水温

针对寒冷地区的污水处理厂工程设计,设计水温是一个非常重要的设计参数,影响了硝化菌比生长速率和反硝化速率等指标。水温设定过低,池容增大,造成不必要的浪费;水温设定过高,存在冬季水质不达标风险。

传统活性污泥法中,水温的降低会导致微生物活性降低,对污染物的去除效果会受到抑制,尤其是总氮的去除,因为低温对硝化反应的抑制很明显,低温条件下传统活性污泥法的硝化速率远低于夏季的硝化速率。而MBR工艺的长泥龄、高污泥浓度以及微生物的群聚效应能有效提升生物脱氮效果,使得污泥在冬季低温条件下仍能保持较高的硝化速率,反硝化速率受温度和季节的影响亦较小^[4]。因此,MBR工艺在寒冷地区具有比较明显的优势,水温的设定不需要过于保守。

根据喀喇沁旗原污水处理厂和赤峰地区其他污水处理厂的进水水温统计数据,冬季进水水温为7~9℃。综合MBR工艺的优势和保温措施的设计,最终污水处理厂的设计温度为9℃,在保证处理效果的前提下尽量减少池容,节约造价。

② 三段回流,充分利用溶解氧

另一个工艺特点是设置了三段回流,即第一段为膜池污泥回流至好氧池前端,回流比为500%;第二段为好氧池末端的混合液回流至缺氧池,回流比为400%;第三段为缺氧池末端的混合液回流至厌氧池,回流比为200%。混合液在膜池内通过膜的

高效截留,污泥被截留在膜池中,高浓度污泥回流到好氧池中,膜池回流污泥的溶解氧含量高,回流至好氧池可以使溶解氧得到充分利用,在一定程度上降低了鼓风量,从而减少了运行成本。好氧池末端的混合液回流至缺氧池,进行充分的反硝化,避免从膜池富氧混合液直接回流至缺氧池,破坏缺氧池的反硝化环境。缺氧池末端的混合液回流至厌氧池,缺氧池末端 NO₃⁻-N 浓度较低,不会影响厌氧区的生物除磷效果。

③ 应对寒冷地区的保温设计

寒冷地区的污水处理厂设计中,保温的细节设计尤为重要。该工程保温措施如下:

a. 避免污水直接明露于室外。预处理中细格栅、曝气沉砂池和膜格栅上方采用框架围护结构进行保温;A²/O 池上方采用彩钢保温板封闭,封闭式

的结构有助于水温的保持;MBR 池上方房间为框架围护结构,起到保温和设备运输的作用。

b. 设计时充分考虑各种与污水直接或间接接触的设备的防冻保温问题,防止结冰影响污水处理厂正常运行,设备均放置于房间内。

c. 厂内管道布设考虑冬季防冻,厂区最大冻土深度为 1.8 m,管道尽量埋设在冰冻线以下,局部冰冻线以上除空气管线外,其他管线采取保温处理。

5 运行效果和运行经验

5.1 运行效果

该工程稳定运行后,处理水量为(1.9~2.3)×10⁴ m³/d。2018 年 10 月—2019 年 5 月的进、出水水质见表 2,各污染物指标去除率见图 2。

由表 2 中的数据可见,出水水质优于一级 A 排放标准。

表 2 实际进、出水水质

Tab. 2 Actual influent and effluent quality

项目	平均水温/℃	COD/(mg·L ⁻¹)		BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)		TP/(mg·L ⁻¹)		TN/(mg·L ⁻¹)		NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
10 月	20	206.00	11.68	102.99	4.59	2.17	0.31	25.08	6.55	19.13	0.20
11 月	15	209.93	12.88	101.16	5.31	2.00	0.24	27.60	5.30	18.27	0.77
12 月	11	217.46	10.69	105.03	5.06	3.16	0.26	33.37	6.21	22.28	0.21
1 月	8	202.14	16.25	101.02	5.89	3.16	0.23	34.48	8.84	22.55	1.29
2 月	10	205.74	15.33	102.87	7.46	3.67	0.14	37.26	6.54	25.50	0.82
3 月	13	236.18	16.63	118.09	7.46	4.41	0.09	39.50	4.57	27.16	0.48
4 月	17	223.04	12.76	111.52	5.26	3.35	0.09	36.13	3.63	24.62	0.40
5 月	20	201.94	13.64	100.97	6.01	2.87	0.07	32.93	4.11	23.59	0.26

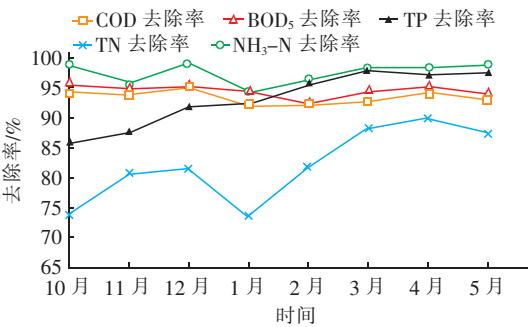


图 2 各污染物去除率

Fig. 2 Removal efficiency of pollutants

污水厂水温从 12 月份急剧下降,直至 3 月份均属于低温运行期,1 月份的平均水温仅为 8℃,而从图 2 可以看出,A²/O+MBR 工艺显示了对污染物的去除效果,几乎没有受到低温的影响。

A²/O+MBR 工艺对 COD 和 BOD₅ 的月平均去除率均达到 90% 以上。分析其原因为系统的污泥

浓度高,补偿了微生物活性低的劣势,并没有使活性污泥整体的活性降低;另外,在微滤膜的表面形成了凝胶层,其筛滤、吸附作用可截留部分溶解性高分子物质^[5]。

A²/O+MBR 工艺对氨氮的月平均去除率在 94%~99%,这是由于该系统泥龄较长,适于世代时间较长的硝化菌的生长繁殖;同时,微滤膜的截留使得硝化菌不易流失;另外,冬季时好氧池保持较高的 DO 浓度(4 mg/L 以上),保证了硝化反应的彻底进行。

A²/O+MBR 工艺对 TN 的月平均去除率均高于 70%,在 4 月达到了 90%。该工艺对 TP 的月平均去除率为 86%~98%(在此期间未向生物池投加 PAC 进行化学除磷),这说明三段回流的方式给厌氧池和缺氧池提供了良好的厌氧和缺氧环境。虽然 12 月—3 月低温运行时,好氧池末端的 DO 均保持

在4 mg/L以上,但实测厌氧池的ORP均稳定在-500~-400 mV,缺氧池的ORP均稳定在-200~-100 mV,使得系统生物除磷和反硝化的能力稳定保持在较高的水平。

5.2 冬季运行经验

冬季(12月—3月)运行主要注意两点:

① 保持较高的污泥浓度。喀喇沁旗锦山污水处理厂冬季运行时,缺氧池污泥浓度控制在8 g/L,好氧池污泥浓度为10 g/L,膜池污泥浓度达到12 g/L。维持较高的污泥浓度补偿了低温条件下污泥活性的下降,出水水质可以稳定达标。但是污泥浓度也不宜过高,容易加速污染物在膜表面的沉积吸附从而加重膜污染。

② 适当增加曝气量。冬季好氧池末端DO控制在4 mg/L以上,维持系统内良好的好氧环境,能适当提高污泥活性,保证出水水质的稳定达标。

6 结论

① $A^2/O + MBR$ 工艺在我国寒冷地区的污水处理应用中具有比较明显的优势,主要原因是其具有长泥龄、高污泥浓度和微生物的群聚效应等特点,能补偿低温对微生物活性的影响。该工艺实际应用于赤峰市喀喇沁旗并实现了较好的运行效果,为寒冷地区污水厂的设计和运行提供了很好的借鉴。

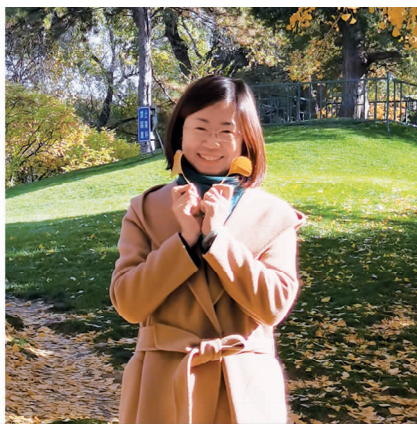
② 在设计时,要充分考虑保温的细节设计,同时合理设定设计参数,由于MBR系统的优势,设计水温的设定不必过于保守。采用三段式回流,能充分利用膜池的溶解氧和避免富氧混合液对厌氧池和缺氧池的环境条件造成冲击。

③ 在冬季运行时,需要保持较高的污泥浓度(缺氧池的污泥浓度控制在8 g/L左右比较适宜)和适当增加曝气量(好氧池末端DO控制在4 mg/L以上),以使出水水质稳定达标。

参考文献:

- [1] 黄菲,梅晓洁,王志伟,等. 冬季低温下MBR与CAS工艺运行及微生物群落特征[J]. 环境科学,2014,35(3):1002-1008.
Huang Fei, Mei Xiaojie, Wang Zhiwei, et al. Diversity of operation performance and microbial community structures in MBRs and CAS processes at low temperature[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 1002-1008 (in Chinese).

- [2] 王振宇,王晓昌,金鹏康,等. $A^2/O - MBR$ 污水处理系统运行特性研究[J]. 给水排水,2011,37(6):31-34.
Wang Zhenyu, Wang Xiaochang, Jin Pengkang, et al. Study on operation characteristics of $A^2/O - MBR$ wastewater treatment system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(6): 31-34 (in Chinese).
- [3] 周磊,陈小刚,张洪林,等. 缺氧-好氧MBR工艺及膜性能的研究[J]. 水处理技术,2011,37(1):91-94.
Zhou Lei, Chen Xiaogang, Zhang Honglin, et al. Research on process in $A/O - MBR$ and performance of membrane[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(1): 91-94 (in Chinese).
- [4] 刘捷,陆爽君,吴鹏,等. 温度对复合厌氧折流板膜生物反应器处理生活污水效能的影响[J]. 环境工程学报,2014,8(2):553-558.
Liu Jie, Lu Shuangjun, Wu Peng, et al. Effect of temperature on complex anaerobic baffled membrane reactor for domestic sewage treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(2): 553-558 (in Chinese).
- [5] 金建华,刘建广,孙书洪,等. 低温下一体式膜生物反应器处理城市污水研究[J]. 中国给水排水,2008,24(17):28-30,35.
Jin Jianhua, Liu Jianguang, Sun Shuhong, et al. Study on urban wastewater treatment by integrated membrane bioreactor at low temperature[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(17): 28-30, 35 (in Chinese).



作者简介:王卓艺(1982—),女,黑龙江牡丹江人,硕士,高级工程师,主要从事污水处理及流域综合治理等方面的设计工作。

E-mail: wangzhuoyi@tsinghuagh.com

收稿日期:2020-01-09