

膜生物反应器与人工湿地工艺处理生活污水

柴培宏^{a,b},金峰^{a,b},陈飞勇^b,张洋^{a,b},张辉^b

(长江科学院 a. 生态修复技术中心; b. 武汉长建创维环境科技有限公司, 武汉 430010)

摘要:针对高尔夫球场的生活污水直接排放产生的污染环境 and 影响人们生活等问题,结合高尔夫球场每天需要大量用水灌溉的情况,提出构筑以“膜生物反应器+人工湿地”为主体工艺的水处理和回用系统对工人生活区的生活污水进行深度处理。处理后的生活污水可以补给湖水,实现废水循环利用,节约水资源,降低环境污染,有效解决了生活污水排放和球场用水紧张的问题,具有一定的经济效益和社会效益。

关键词:生活污水;膜生物反应器;人工湿地;生态处理

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-5485(2013)10-0017-04

1 水质设计标准

随着人民生活水平提高,生活污水量不断增多,同时由于水资源日益短缺及人们环保意识不断增强,生活污水处理及回用在提高污水再利用、节约水资源和降低水环境污染等方面显得尤为重要。

国内某高尔夫球场项目施工人员生活污水未经处理直接排放,严重影响周边人们的生活和污染了周围的环境;与此同时,高尔夫球场每天灌溉需要大量用水,而项目区域内高尔夫球场浇灌用水极度紧张。

为有效解决生活污水排放和球场浇灌用水紧张的问题,在工人生活区构筑污水处理系统,处理后的出水用于补给湖水,不仅实现了废水零排放、降低环境污染风险,而且还节约了有限的水资源,体现了国家提倡的节约、环保的循环经济理念。

1.1 污水处理规模

本系统污水主要为工人生活区的生活污水,根据业主提供资料,参考《广东省用水定额》和《室外排水设计规范》(GB50014—2006),确定设计规模为100 m³/d,总变化系数K_z=2.30。

1.2 水质设计

参考相关生活污水水质,对污水处理系统的进水水质的主要指标设计见表1^[1]。

表1 设计进水水质

Table 1 Designed influent water quality

COD _{cr} / (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	pH	TP/ (mg·L ⁻¹)	粪大肠杆菌/ (个·L ⁻¹)
300~400	200	30	6~9	1~5	>10 ⁶

生活污水进行深度净化处理后,出水水质要求达到《中华人民共和国地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类水质标准,出水水质的主要指标见表2。

表2 设计出水水质

Table 2 Designed effluent water quality

COD _{cr} / (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	pH	TP/ (mg·L ⁻¹)	粪大肠杆菌/ (个·L ⁻¹)
≤40	≤10	≤2	6~9	≤0.4	<40 000

2 方案设计与工程实施

2.1 现场水质分析

本工程位于工人生活区附近,与普通生活小区生活污水相比,水量变化较大;随着水体富营养化越来越严重,本工程设计出水用于补给湖水,因此,在常规降解COD_{cr}和BOD₅的同时,更应注重对N和P污染物的去除。

2.2 工艺选择

本工程污水来水变化较大,应设计调节池;在去除COD_{cr}和BOD₅的同时,对N和P污染物去除,采用A/O(脱氮的缺氧-好氧)工艺^[2];为降低占地面积,减少污泥产量,同时保证出水水质,采用膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)工艺^[3];除磷一般有生物除磷和化学除磷^[4],单独采用生物除磷工艺,难以达到出水含磷浓度低于0.4 mg/L的排放要求,可采用化学法进一步除磷(作为辅助除磷);为保障出水水质,同时出于景观效果考虑,后面增设人工湿地^[5]。

2.3 工艺流程

根据本项目水质目标,从保障出水效果、便于自动化运行、节约投资和运行维护费用等方面考虑,主体采用“膜生物反应器+人工湿地”组合工艺,具体工艺流程如图 1。

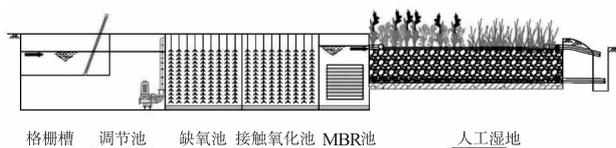


图 1 工艺流程图

Fig. 1 Process flow

首先通过格栅对污水中大颗粒污染物进行拦截;接着在调节池进行水质水量调节;经调节后的污水由提升泵提升到缺氧池;然后进入接触氧化池和 MBR 池,缺氧池与接触氧化池及 MBR 池构成 A/O 工艺^[2],同时辅以化学除磷技术;最后进入湿地进行深度处理。

2.4 主要构筑物及设备

本工程前处理主要构筑物为格栅槽(位于调节池内)、调节池、缺氧池、接触氧化池、MBR 池、污泥池、清水池及设备间,采用地下钢混结构,占地面积 80 m²左右;人工湿地采用砖混结构,占地面积为 300 m²,顶部与地面平行。

2.4.1 格栅槽与调节池

主要作用:拦截污水中大颗粒污染物,调节进水水质水量,确保系统进水均匀。

水力停留时间(HRT):9.0 h。

主要设备与参数:提升泵($Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 10 \text{ m}$, $N = 0.75 \text{ kW}$)2 台,液位计控制提升泵启闭。

2.4.2 缺氧池

主要作用:与接触氧化池和 MBR 池构成反硝化生物脱氮系统,反硝化菌利用污水中的有机物作碳源,将 MBR 池回流液带入的 NO_3^- 和 NO_2^- 还原为 N_2 ,达到脱氮效果^[2]。

水力停留时间(HRT):2.1 h。

主要设备与参数:混合搅拌器($N = 15 \text{ kW}$)1 台。

2.4.3 接触氧化池和 MBR 池

主要作用:高效降解 COD, N, P 等污染物,降低出水悬浮物。

水力停留时间(HRT):接触氧化池 $\text{HRT} = 12.2 \text{ h}$;MBR 池 $\text{HRT} = 3.0 \text{ h}$ 。

主要设备与参数:回流泵($Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 10 \text{ m}$, $N = 0.75 \text{ kW}$)2 台;污泥泵($Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 10 \text{ m}$, $N = 0.75 \text{ kW}$)2 台;帘式中空纤维膜反应装置

1 套(不锈钢支架 1 套,膜组件材质为 PVDF,公称膜孔径 $0.05 \mu\text{m}$,设计通量 $10 \sim 20 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)。

2.4.4 设备间

主要作用:安装鼓风机、产水泵、反冲洗泵、化学除磷及反冲洗装置等设备。

主要设备与参数:罗茨鼓风机($Q = 1.66 \text{ m}^3/\text{min}$, $N = 2.2 \text{ kW}$)3 台;产水泵(采用浮球液位计控制其启闭)2 台;反冲洗泵 1 台;化学除磷及反冲洗装置各 1 套。

2.4.5 人工湿地

主要作用:采用复合垂直流人工湿地技术^[5],深度去除 COD, N, P 等污染物,进一步降低出水悬浮物。

水力停留时间(HRT):24.0 h。

填料与植物:填料选择不同粒径的碎石和陶粒,有效厚度为 80 cm;植物选择美人蕉、梭鱼草、鸢尾、菖蒲和再力花 5 种植物,种植间距为 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 。

2.5 土建工程

本系统前处理土建工程大多属于特种结构,对裂缝宽度、抗渗性等控制严格,采用 C25 的防水混凝土,抗渗标号 S6,外表面并作防腐处理;人工湿地底部采用钢筋混凝土和复合土工膜双重防渗。

2.6 电气控制

外部输配电电缆、控制电缆采用地下电缆沟敷设方式;采用 PLC 系统进行自动化控制,主要控制调节池的提升泵、搅拌器和浮球液位计,缺氧池的搅拌器,MBR 池的回流泵、浮球液位计和污泥泵,设备间内的鼓风机、产水泵和反冲洗泵等设备。

3 处理效果及效益分析

3.1 处理效果

系统处理后经当地环境检测部门检测的水质指标见表 3,处理效果如下:

(1) 由表 3 可见,该处理系统出水满足设计要求,水质达到《中华人民共和国地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类水质标准;

(2) 本系统前处理部分采用地理式设计,同时对湿地植物搭配方面进行景观优化,提高了系统的整体景观效果,实现了与周围景观相协调;

(3) 本系统采用 MBR 技术,省去了二沉池与消毒池,有效保留活性污泥生物体,降低了剩余污泥量,减少了污泥处理成本;

(4) 本系统在接触氧化池与 MBR 池之间增设

表 3 系统进出水水质

Table 3 Water quality of the influent and effluent of the system

指标	COD _{cr} /(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	pH	TP/(mg·L ⁻¹)	粪大肠杆菌/(个·L ⁻¹)
进水	169	50	26.800	7.1	2.350	9.2 × 10 ⁶
MBR 出水	<10	<2	0.361	7.2	0.551	<20
湿地出水	<10	<2	0.116	7.6	0.095	2.3 × 10 ²

溢流堰,更好地截留接触氧化池活性污泥,降低 MBR 池内的膜污染,延长膜组件的使用寿命;

(5) 污水经 MBR 池处理后进入湿地,降低了湿地污染负荷,减少了湿地堵塞,利于湿地的长期运行;湿地系统对污水中的氮磷做进一步深度处理,保证了系统出水水质。

3.2 经济效益

3.2.1 年工程建设成本 M_1

本工程建设总承包价约为 142 万元,该工程整体使用寿命为 50 a,则工程建设投资成本为 2.84 万元/a。

3.2.2 年运行费用 M_2

运行费用主要包括电费、药品费和湿地费用等。

化学除磷药品浓度为 10% 的聚合硫酸铁溶液,投加量约为 50 mL/t,由于聚合硫酸铁具有一定腐蚀性,同时处于生态考虑,药品主要在系统调试时投加,随着系统中活性污泥不断繁殖、湿地植物和微生物生态系统成熟,投加量逐渐减少,当系统调试完成进入良性循环后,即停止投加,将其作为水质改善的应急措施,因此这部分药品费用可忽略不计。

湿地费用基本上可归纳为人工费,材料消耗和植物种苗补充费,检修、事故处理和不可预见费^[5],材料消耗和植物种苗补充费,根据实际工程推算,这部分费用可按每年 0.03 ~ 0.04 元/m² 进行估算,检修、事故处理和不可预见费可按每年 0.01 ~ 0.02 元/m² 进行估算,即 12 ~ 18 元/a,因此,此费用也可忽略不计。

本系统用电功率以 4 kW 计,每天运行 24 h,本地工业用电 0.7 元/(kW·h),则污水处理电费运行费用约为 0.67 元/m³ (4 × 24 × 0.7 ÷ 100)。

本系统年运行费用 $M_2 = 100 \times 0.67 \times 365 = 2.45$ 万元/a (不包括人工费)。100 为每天设计处理的水量(m³)。

3.2.3 年节约自来水水费 M_3

当地水价按 3.5 元/m³ 计,排污费 1.5 元/m³:

$$M_3 = 100 \times (3.5 + 1.5) \times 365 = 18.25 \text{ 万元/a.}$$

3.2.4 年收益 M_4

$$M_4 = M_3 - M_2 - M_1 = 18.25 - 2.45 - 2.84 = 12.96 \text{ 万元/a.}$$

通过对本系统建设成本与年收益分析,大约

11 a 可收回建设成本投资,与常规污水处理项目相比,投资回收期相对偏长,可进一步优化设计,降低投资成本。

3.3 环境效益

(1) 本污水处理系统可有效地降低污水排放量,缓解高尔夫球场用水紧张,大大节约了清洁水的使用和消耗量;

(2) 本污水处理系统能有效防止周边生态系统的污染,改善周边生态环境,在处理回用生活污水的同时创造出一座生态湿地公园;

(3) 本污水系统湿地部分将有力地提升区域生态承载力,为哺乳动物、昆虫和植物提供良好的栖息和生长环境,促进生物多样性;同时具有涵养水源、地下水压咸、增加空气湿度的作用。

3.4 社会效益

(1) 本污水处理系统将为人们展现出一个绿色、自然、和谐的高标准生态治污示范工程,具有显著的示范效应;

(2) 本污水处理系统在培养人们生态、环保、低碳的生活理念方面起着非常直观的教育作用;同时提高人们节约资源、重复利用资源、尊重自然的生态理念。

4 结 语

(1) 本污水处理系统在降低污水中 COD_{cr} 的同时,实现了深度脱氮除磷,出水用于补给河湖,实现生态补水。

(2) 采用接触氧化生物膜技术,利于微生物附着生长,对水质、水量变化适应性强;在接触氧化池与 MBR 池之间增设溢流堰,更好地截留接触氧化池活性污泥,降低 MBR 池内的膜污染,延长膜组件的使用寿命,有利于 MBR 技术的推广应用。

(3) MBR 池出水进入人工湿地进行深度处理,一方面降低了进入湿地的污染负荷,减少了湿地堵塞,利于湿地的长期运行;另一方面对湿地进行景观设计,使得该污水处理系统与周围环境相互协调,便于其在小区内的推广应用。

(4) 本污水处理系统前处理好氧部分设计占地面积偏大,增加了工程投资和日常曝气量,造成本工

程造价及运行费用偏高;

目前,MBR 和人工湿地技术在国内外的应用越来越受到关注,如何将这 2 种技术进行高效整合,在保证出水水质的同时,更好地降低工程和运行成本,优化景观效果,融入周围环境,值得做进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 张思梅,胡淑恒. 某小区生活污水处理工艺设计与研究[J]. 合肥学院学报(自然科学版), 2010, 20(3): 75-77. (ZHANG Si-mei, HU Shu-heng. Study and Tentative Design of Domestic Sewage Treatment in Subdistricts [J]. Journal of Hefei University (Natural Sciences), 2010, 20(3):75-77. (in Chinese))
- [2] 高廷耀,顾国维,周 琪. 水污染控制工程[M]. 北京:高等教育出版社,2006. (GAO Ting-yao, GU Guo-wei, ZHOU Qi. The Project of Controlling Water Pollution [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chi-

nese))

- [3] CECS 152:2003, 一体式膜生物反应器污水处理应用技术规程[S]. (CECS 152:2003, Technical Specification for Application of Integrative Submerged Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment [S]. (in Chinese))
- [4] 陶俊杰,王军亭,陈振选,等. 城市污水处理技术及工程实例[M]. 北京:化学工业出版社, 2005. (TAO Jun-jie, WANG Jun-ting, CHEN Zhen-xuan, *et al.* Urban Sewage Treatment Technology and Engineering Example [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [5] 吴振斌. 复合垂直流人工湿地[M]. 北京:科学出版社,2008. (WU Zhen-bin. Constructed Wetland with Integrated Vertical-flow[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))

(编辑:赵卫兵)

Treatment of Domestic Sewage by MBR and Constructed Wetland Process

CHAI Pei-hong^{1,2}, JIN Feng^{1,2}, CHEN Fei-yong², ZHANG Yang^{1,2}, ZHANG Hui²

(1. Ecological Restoration Technique Centre, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Wuhan CTI-CRSRI Engineering & Environment Co., Ltd., Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to solve the domestic sewage discharge and the irrigation water stress of golf course, the combined process of membrane bioreactor (MBR) and constructed wetland is used for advanced treatment and reuse of domestic sewage discharge from workers' living quarter of a golf course. The effluent is used to supply the lake water. It reflects the concept of circular economy, reduces environmental pollution, and has some social and economic benefits.

Key words: domestic sewage; membrane bioreactor (MBR); constructed wetland; ecological treatment

(上接第 16 页)

velocity variations of the top-layer flow in the opposite direction. Their combined effect is different when the water depth above the intake h' varies. For the box-style intakes, when h' is small, the viscous diffusion dominates the variation, and velocity increments of the same direction are produced at the intake-layer and the top-layer of the flows. When h' is big, the pressure dominates the variation, and velocity variations of the opposite direction are produced at the intake-layer and the top-layer of the flows. Mushroom-style intakes absorb water from all horizontal directions, resulting in two areas of concentrated pressures above and below the intake. On the edge of these two areas, the water layers near the intake move towards the intake, and those at the bottom and the top are pushed away from the intake.

Key words: submerged water intake; 3-D numerical model; variation of vertical distribution of velocity