

平板膜生物反应器处理含50%海水污水的优化研究

王营章¹, 朱心悦¹, 刘志强²

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要:为确定含海水污水的最优处理条件,在生活污水中加入等量海水作为研究对象,研究平板膜生物反应器(MBR)在不同操作条件下(回流比,曝气强度,污泥浓度)的处理效果。结果表明,利用A/O-MBR处理含50%海水污水的最优条件为:回流比为300%;曝气量为3 m³/h;污泥浓度为5 000~6 000 mg/L。出水COD含量为17.9~24.4 mg/L,氨氮含量为2.23~3.28 mg/L,总氮含量为7.27~9.05 mg/L,均满足一级A的国家标准。COD、氨氮及总氮的去除率分别为94.52%,93.59%和86.69%。造成膜污染的主要因素是膜孔堵塞带来的内部污染,通过水洗—酸洗—碱洗三个步骤可基本恢复膜通量。

关键词:平板膜生物反应器;平板膜;含海水污水;膜污染;回流比;曝气量;混合液悬浮固体颗粒

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)06-0073-06

Treatment Optimization of Wastewater with 50% Seawater by Flat-sheet Membrane Bioreactor

Wang Yingzhang¹, Zhu Xinyue¹, Liu Zhiqiang²

(1. College of Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: To determine the optimum treatment conditions of wastewater containing 50% of seawater, this research studies the treatment effect of flat-sheet membrane bioreactor (MBR) under different conditions of internal reflux ratio (IR), aeration intensity and sludge concentration. Results show that the optimum treatment conditions of wastewater containing 50% of seawater by A/O-MBR are when IR is set as 300% and aeration rate is 3 m³/h and MLSS (mixed liquid suspended solids) is 5 000~6 000 mg/L. The contents of COD, ammonia nitrogen and TN (total nitrogen) in the treated wastewater are respectively 17.9~24.4, 2.23~3.28 and 7.27~9.05 mg/L, meeting the first level A of national discharge standard. The removal rates of COD, ammonia nitrogen and TN are 94.52%, 93.59% and 86.69% respectively. Membrane fouling is mainly caused by internal fouling due to membrane-hole blockage, but the membrane flux can be substantially restored by the procedure of washing, scouring and caustic washing.

Key words: flat-sheet membrane bioreactor; flat-sheet membrane; wastewater containing seawater; membrane fouling; internal reflux ratio; aeration rate; mixed liquor suspended solids

海水冲刷是将海水经过简单的前处理,代替淡水作为冲刷用水,可以有效缓解淡水资源紧张的供求矛盾。而含海水污水的后处理技术,是海水冲刷必须解决的重要技术问题。据统计^[1],冲刷用水大约占到生活用水的35%,且随着人们生活习惯的改变,这一比例还在不断增加,如美国等发达国家的冲刷用水已占生活用水的40%。考虑到社会经济的进一步发展以及风险因素,本文的主要研究对象为含50%海水的污水。

目前广泛应用的后处理方法是活性污泥法,比如香港水务局在处理含冲刷海水的市政污水时采用的是活性污泥A²O法。但是,含盐污水在活性污泥系统中可能存在以下隐患:①一定量的盐会引起污泥泡沫的

收稿日期:2015-05-13

作者简介:王营章(1963—),男,山东潍坊人,副教授,主要从事污水处理理论与技术研究。E-mail:wangyzh628@sina.com

发生,硝化菌流失;②消毒过程中含盐水会产生高溴化物,制约其作为再生水回用。膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)能够有效避免上述弊端,因为 MBR 实现了水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)和污泥停留时间(sludge retention time, SRT)的独立,在 HRT 较短的情况下,给予硝化菌足够的生长时间,并将硝化菌菌群截留在反应器内。另外,微滤膜的截留作用能有效隔离大肠杆菌,消除了消毒副产物带来的隐患^[2]。

近年来,膜生物反应器处理含海水污水的研究在国内外陆续开展^[2-6],其中膜反应器多采用中空纤维膜,鲜有研究选用平板膜。而平板膜具有抗污性能强、机械刚度大、单位膜通量大、能耗低和维护方便等优势。因此,本研究选用平板膜 MBR 技术处理含海水的污水。研究平板膜 MBR 在处理 50% 海水污水时,回流比(internal relux ratio, IR)、曝气强度、污泥浓度(mixed liquid suspended solids, MLSS)三种操作工况对系统性能的影响,为今后处理含海水污水提供操作参数方面的参考。

1 材料与方 法

1.1 实验装置

本实验所采用的膜生物反应器由缺氧段(A 段)和好氧段(O 段),有效容积的比例为 1 : 3(A 段:30 L, O 段:90 L),总有效容积为 120 L。实验所用膜组件是由上海斯纳普膜分离科技有限公司生产的浸没式平板膜(SINAP10),滤膜材质为聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF),共 5 片。运行过程如下:原水在蠕动泵的作用下进入缺氧段,缺氧池内部有 1 台小型潜水泵来搅拌泥水混合液;混合液再通过连通孔进入好氧段,好氧池内设置回流泵 1 台,使硝化液回流至缺氧池;膜组件放置于好氧池内部,除膜组件自带的曝气管,在其底部安放有若干气泡石,通过气泵进行曝气;混合液最后经平板膜过滤,在真空泵的工作下形成出水。反应器系统采用连续进水、间歇出水的方式,泵的开停比为 10 : 3。图 1 为 A/O-MBR 立体结构示意图。

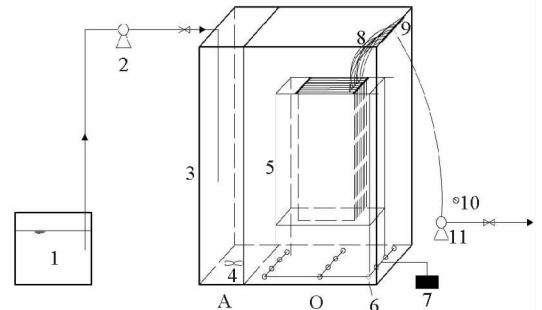
1.2 实验原水

实验原水主要是由实际生活污水和海水混合。实际生活污水取自青岛某高校污水排放口的集水井处,海水取自青岛近海海域。通过向混合污水中加入适量的葡萄糖、NH₄Cl、KH₂PO₄,来调节实验原水中有有机物、氮和磷这类特征污染物的浓度,使其维持在较为稳定的范围内。实验用水的水质指标见表 1。

表 1 实验用水水质

Tab. 1 Quality of raw water

项目	pH	COD/(mg/L)	NH ₃ -N/(mg/L)	TN/(mg/L)
范围	6.8~8	250~590	30~70	32~73



1—调节水箱;2—蠕动泵;3—反应器(A. 缺氧段,O. 好氧段);
4—搅拌装置;5—膜组件;6—曝气石;7—电磁空气泵;
8—抽吸支管;9—集水总管;10—真空压力表;11—真空泵

图 1 A/O-MBR 立体结构示意图

Fig. 1 Structure scheme of A/O-MBR

1.3 污泥接种与驯化

接种污泥取自青岛海泊河污水处理厂二沉池,接种污泥的浓度(MLSS)在 8 000 mg/L 左右,污泥的活性良好。反应器启动后逐渐增加海水比例,高比例的海水会使系统去除率出现波动,经过一定恢复时间再进入稳定运行期,稳定运行后以 10% 的比例增加海水,最终海水比例达到 50%。

1.4 水质分析方法

1) 根据国家规定的标准方法^[7]测定常规污染物含量和水质指标。由于海水中平均氯离子浓度高达 19 000 mg/L,为消除 Cl⁻ 的干扰,本实验采用硝酸银掩蔽^[8];实验中用 AgNO₃ 代替 HgSO₄,将 Cl⁻ 转化为 AgCl 沉淀后,再用标准方法^[7]测定。

2) 污泥浓度(MLSS)的测定。海水中的 NaCl 会在滤纸上形成结晶,干扰 MLSS 的称重结果。为防止这一现象的发生,在完成过滤步骤后,用大约 100 mL 的蒸馏水对滤纸进行清洗,再按照标准重量法进行测定^[9]。

2 结果与分析

实验旨在研究 A/O-MBR 在处理 50% 海水污水时,操作条件(回流比,曝气强度,污泥浓度)对系统性能的影响。通过考察反应器对特征污染物的去除率,探讨利用 A/O-MBR 处理含 50% 海水污水的最优条件,为以后处理含海水污水提供操作参数方面的参考。

2.1 回流比对运行效果的影响

回流比是 A/O 工艺的重要操作参数。为确定含海水污水处理的最佳 IR,本阶段 MBR 反应器共运行 15 天,选用三种不同的 IR(100%,200%,300%)进行操作。在曝气量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$,MLSS 为 $5\ 000\sim 6\ 000 \text{ mg/L}$,总 HRT 为 12 h 的条件下,研究 MBR 对污染物的处理效果,并确定出最佳 IR。

图 2 为 A/O-MBR 在不同 IR 下 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 以及总氮(total nitrogen, TN)去除率。在 IR 为 100%,200%,300% 的情况下,COD(chemical oxygen demand,化学需氧量)出水浓度分别为 19.2~26.1,24.1~28.3,20.6~30.8 mg/L。可以看出,在不同 IR 下运行,COD 的去除率都比较高,而且无明显变化,说明 MBR 对于 COD 的去除作用既稳定又高效。当 IR 为 100%,200%,300% 时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 出水浓度分别为 4.01~4.91,3.49~4.72,3.08~4.58 mg/L。随着 IR 的增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率逐渐升高。在 IR 为 100%,200%,300% 的条件下,TN 出水浓度分别为 17.6~21.7,14.0~21.8,9.94~11.72 mg/L。数据表明,随着 IR 的升高,MBR 去除 TN 的效率逐渐升高。此外,与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 变化情况相比,IR 对 TN 的影响更显著。按照脱氮理论^[10],过小的回流比将会导致比较小的系统脱氮率。不过文献^[11]指出,缺氧池能够还原的硝酸盐数量是一定的,当硝酸盐数量未达到该缺氧池的临界值时,缺氧池内的所有硝酸盐都能够转化为氮气;反之,IR 过大,超过临界值的回流硝酸盐就不能及时参与还原,而且 IR 过高在导致能耗变大的同时,还可能给缺氧池带来大量的溶解氧,缺氧条件遭到破坏,反硝化过程受抑制,降低了系统的脱氮效果。

综上所述,系统运行适宜的 IR 值应该既能保证缺氧环境不被破坏,又能彻底还原回流的硝酸盐。本次实验中,IR 值达到 300% 的情况下,TN 去除率有了明显提升,且出水满足一级 A 的国家标准,可以判断 IR 为 300% 能够满足系统的脱氮要求。

2.2 曝气量对运行效果的影响

曝气过程是活性污泥法至关重要的一个环节。为确定处理含海水污水的最佳曝气量,选用三种不同的工况进行实验。在 IR 为 300%,MLSS 为 $5\ 000\sim 6\ 000 \text{ mg/L}$,总 HRT 为 12 h 的条件下,研究曝气量分别为 2,3,5 m^3/h 时,系统污染物的去除效果,并最终确定出适宜处理含海水污水的曝气量。每个工况运行 5 天,共运行 15 天。

图 3 为 A/O-MBR 在三种曝气量下 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 以及 TN 的去除率。COD 出水浓度分别为 22.64~27.30,17.54~26.24,17.58~25.05 mg/L。可以看出,在不同曝气量下,MBR 对 COD 的处理效果比较稳定,总去除率都较高,且出水能够满足国标一级 A 的标准。去除率随曝气强度的增大而增大,分析认为:①曝气量加大,不仅增加了水中的溶解氧(dissolved oxygen,DO),而且增大的水力剪切力使污泥颗粒粒径减小,有助于溶解氧传递速率和传质效率的提高,促进好氧微生物的新陈代谢,加速污染物的降解;②曝气强度增加,污泥颗粒被打碎,影响污泥的沉降性能,但污泥颗粒属于较大的物质,无法透过微滤膜,只能影响上清液,不会影响系统出水。综上所述,曝气量升高,微生物的降解能力提高,优化了出水 COD 去除率;但污泥

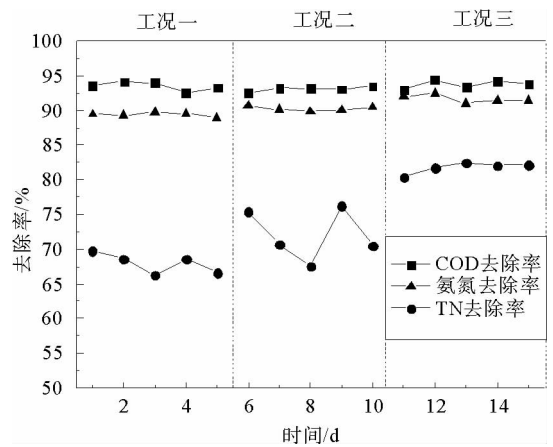


图 2 回流比对比对去除效果的影响

Fig. 2 Effects of IR on removal efficiency

沉降性能恶化。

在曝气量为 2, 3, 5 m³/h 时, 出水 NH₃-N 浓度分别为 3.36~4.64, 2.74~3.43, 2.15~2.93 mg/L, 出水均能满足一级 A ≤ 5 mg/L 的国家标准。由图 3 可知, NH₃-N 总去除率随着曝气量的增加而增加。相比较而言, 曝气量为 2 m³/h 时去除率较低。主要因为曝气量较小条件下, 溶解氧(DO)浓度较低, 而硝化过程需要足够的 DO 完成氧化, DO 浓度较低抑制硝化菌活性, 影响 NH₃-N 的去除效果。当曝气量为 3 m³/h 时, DO 浓度升高, 为硝化细菌的生命活动提供了足够的氧, 随之 NH₃-N 的去除效果增强; 曝气量增大至 5 m³/h 时, 随着 DO 浓度升高, NH₃-N 的去除率进一步提高, 保持在 94% 以上。

曝气量为 2, 3, 5 m³/h 时, 出水浓度分别为 9.63~11.69, 8.39~9.75, 9.81~10.98 mg/L。随着曝气量的增加, TN 的平均总去除率为 83.12%, 85.59%, 84%, 说明 TN 总去除率先上升后下降, 当曝气量为 3 m³/h 时, TN 去除效果最佳。分析认为: ① 当曝气量为 2 m³/h 时, DO 浓度较低, 使硝化效率下降, 由上文可知氨氮去除率较低, 导致总氮去除效果较差。② 当曝气量为 5 m³/h 时, DO 浓度过高, 回流至缺氧池的 DO 破坏系统内缺氧环境, 抑制了反硝化过程的进行, 导致出水 TN 浓度上升。

曝气量的变化对 COD 的去除效果无显著影响, NH₃-N 随着曝气量的增加而升高, TN 去除率皆呈现先增大后减小的变化, 在曝气量为 3 m³/h 时出水效果最好, 即曝气量的升高, 促进了硝化作用, 但不利于缺氧反硝化和厌氧释磷作用。因此, 处理 50% 含海水污水的 A/O-MBR 系统最佳曝气量为 3 m³/h。

2.3 污泥浓度对运行效果的影响

污泥浓度(MLSS)对污染物的去除效果和膜污染的速率有着显著影响, 为优化处理效果和缓解膜污染, 需要找出最适宜的 MLSS。本次实验反应器共运行 15 天, 采用用三种不同范围的 MLSS 进行研究。通过排泥和接种来改变系统污泥浓度, 排出和待接种的污泥通过间歇曝气的方式保藏, 在曝气停止的间歇期间沉淀并撇除上清液, 然后引入含海水 50% 的污水进行曝气。主要考察 MLSS 为 3 000~4 000, 5 000~6 000, 7 000~8 000 mg/L 三种工况下, 污泥浓度对系统的影响。此阶段 IR 为 300%, 曝气量为 3 m³/h, 总 HRT 为 12 h。

由图 4 可知, 当污泥浓度(MLSS)较低时, COD 出水浓度为 32.22~51.33 mg/L, 系统对 COD 去除率平均为 89.37%。随着 MLSS 增至 5 000~6 000 mg/L, COD 出水浓度为 17.93~24.40 mg/L, 去除率也增加为 94.52%。当 MLSS 超过 7 000 mg/L, 去除率随 MLSS 增加反而降低至 91.46%, COD 的出水浓度为 26.70~40.22 mg/L。造成上述现象的可能原因主要为: 实验初期的 MLSS 较前阶段下降, 污泥负荷升高, 因此 COD 去除率也较低。进入第 5 天, MLSS 浓度升高, 使得反应器内微生物数量变多, MBR 的降解能力加强, 所以 COD 的去除率随之升高。当 MLSS 超过 7 000 mg/L 时, 污泥负荷

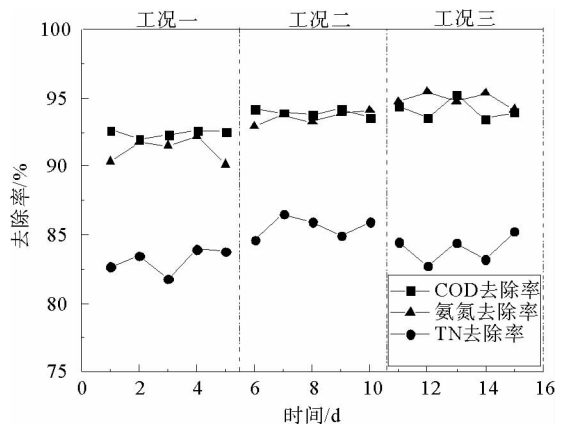


图 3 曝气量对去除效果的影响

Fig. 3 Effects of Aeration on removal efficiency

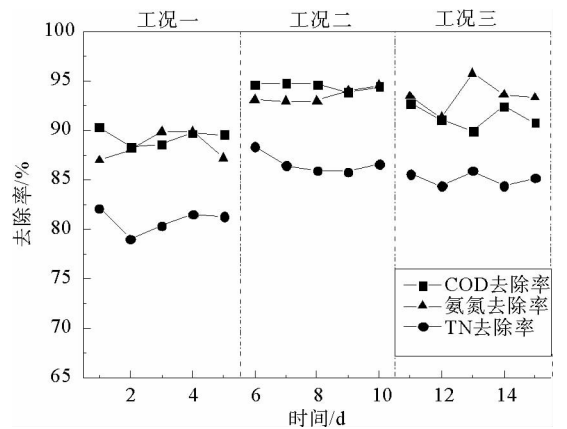


图 4 MLSS 对 COD 去除效果的影响

Fig. 4 Effects of MLSS on COD removal efficiency

率下降,营养物质反而不足,加上 DO 在高 MLSS 下传递和传质效率不足而使得微生物活性降低,导致 COD 的去除率有所下降。

如图 4 所示,MLSS 控制在 5 000~6 000 mg/L 为最佳, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效率先随着 MLSS 的增加而上升。但 MLSS 超过 7 000 mg/L 后, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的处理效果反而变差。这是由于当 MLSS 较低时,污泥负荷率比较高,活性污泥系统对氨氮的降解能力有所不足。但是 MLSS 增加超过一定量后,由于 MLSS 过高,使得 DO 传递效率和传质效率过低,抑制污泥内硝化菌的生命活动,而且研究^[12]表明累积的硝化副产物抑制硝化菌的作用,使得处理效果不能进一步增强。

由图 4 可知,MLSS 为 3 000~4 000 mg/L 时, TN 的去除率较低,仅为 80.91%;当 MLSS 增加至 5 000~6 000 mg/L 时, TN 去除率上升至 86.69%;但是 MLSS 超过 7 000 mg/L 后, TN 的去除率下降至 85.13%。这可能是因为:相同曝气量下,MLSS 低时 DO 传质效率较强,使得缺氧环境受 DO 影响,反硝化作用被抑制;当 MLSS 继续升高超过一定程度时,微生物的代谢产物积累,抑制硝化菌和亚硝化菌的活性, TN 的去除率有所下降^[13]。

MLSS 在一定的范围内升高,有助于 MBR 降解污染物,但超过一定浓度反而会影响污泥的活性。结合能耗及膜污染方面加以考虑,可得出处理含海水污水的最优 MLSS 为 5 000~6 000 mg/L。

2.4 膜污染情况研究

根据 Darcy 定律,指出膜通量和 TMP(transmembrane pressure,跨膜压差)的关系:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (1)$$

其中: J —膜通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ΔP —TMP, kPa ; μ —渗透粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R_t —膜阻力, m^{-1} 。

在通量恒定的情况下,跨膜压差 TMP 与过膜阻力 R_t 呈现线性相关,换言之, ΔP 值能够表征膜的 R_t 值,反映其污染情况。本实验中反应器在恒定通量下运行,利用抽吸泵连接处的真空压力表实时监测 ΔP 值。根据其变化趋势,平板膜的 ΔP 值变化可分为两个阶段:①第 24 天之前的运行时间内, ΔP 维持在恒定状态,保持在 2.05 kPa/片左右。②第 25~45 d,随着系统的运行, ΔP 逐渐增大,在第 45 天时达到 2.71 kPa/片。根据“二次动态膜理论”,膜污染主要分为三个阶段:①膜表面的二次动态膜处于动态平衡状态,此时的 TMP 处于较低的状态;②二次动态膜上的小分子颗粒、EPS 和 SMP 渐渐累积在膜孔上,造成不可逆污染,导致 ΔP 慢慢上升;③二次动态膜自身的孔隙进一步受到阻塞,形成一层致密的凝胶层^[14],这时的二次动态膜加剧膜污染,使得 TMP 进入快速增长阶段。因本次实验周期较短(45 天),未能观察到快速增长的阶段, TMP 的变化主要反映了前两个阶段膜污染机理。

根据式(1)可计算出最终过滤总阻力 R_t 为 $8.14 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ 。系统启动前在给定压力下用干净的膜对清水进行过滤,即可得到每片膜的固有阻力 R_m 为 $6.03 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$;当 TMP 达到 2.71 kPa/片时,将膜元件从 A/O-MBR 中取出,用清水水柱冲洗干净,然后测得膜在定压下的通量,所得数据其实就是膜固有阻力 R_m 与不可逆阻力 R_{ir} 之和,即可求得不可逆阻力 R_{ir} 为 $1.19 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$,过滤总阻力 R_t 减去 R_m 与 R_{ir} 之和为可逆阻力 R_r 为 $0.92 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ 。计算可得,内部阻力 R_{ir} 占污染阻力 R_t 的 56.4%,是膜污染的主要因素,综上所述,膜污染上升的主要原因是膜孔堵塞造成的不可逆污染。

膜清洗选用离线方法。通过自来水洗—酸洗(草酸溶液清洗)—碱洗(次氯酸钠+氢氧化钠混合水溶液清洗)三个步骤完成膜组件的清洗过程,来修复膜通量。清洗后的 TMP 下降至 2.01 kPa/片。

3 结论

通过 A/O-MBR 系统处理含海水污水操作参数的优化研究,可得到如下结论:

1)不同 IR 条件下运行,MBR 工艺对 COD 的去除率都比较高,达到 93%以上,而且无明显变化。随着 IR 的增加,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的处理效果均有提高,对 TN 的影响更加显著。反应器在 IR=300%时,对 TN 去除效果显著优于其他工况,平均去除效率为 81.7%。本阶段实验得出,最佳 IR 比为 300%。

2)在不同曝气量下运行,MBR 工艺对 COD 的处理效果比较稳定,总去除率都较高,且出水能够满足国

标一级 A 的标准。COD 去除率随曝气强度的增大而增大。随着曝气量的增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的总去除率随之升高。TN 总去除率随着曝气量先上升后下降, 当曝气量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, TN 去除效果最佳 86.69%。该阶段实验得到的最优曝气量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3) 当 MLSS 为 $3\ 000\sim 4\ 000 \text{ mg/L}$ 时, 系统对各污染物的去除率总体较差。当 MLSS 增至 $5\ 000\sim 6\ 000 \text{ mg/L}$, COD 去除率也增加为 94.52%, 当 MLSS 高于 $7\ 000 \text{ mg/L}$ 时, COD 的去除率减小至 91.46%。MLSS 为 $5\ 000\sim 6\ 000$ 和 $7\ 000\sim 8\ 000 \text{ mg/L}$ 时, 系统内 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果较好, 平均去除率分别保持在 93.59% 和 93.54%。TN 总去除率随着 MLSS 的升高先上升后下降。该阶段得到的最优 MLSS 范围为 $5\ 000\sim 6\ 000 \text{ mg/L}$ 。

4) 造成膜污染的主要因素是膜孔堵塞带来的内部污染, 通过水洗—酸洗—碱洗三个步骤可基本恢复膜通量。

参考文献:

- [1] 马颖, 郭华宇, 孙国周, 等. 海水冲厕应用与研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2013(3): 67-70.
Ma Ying, Guo Huayu, Sun Guozhou, et al. Research progresses in the application of toilet flushing with seawater[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2013(3): 67-70.
- [2] Tam L S, Leung W Y, Tang T W. A pilot study on performance of a membrane bio-reactor in treating fresh water sewage and saline sewage in Hong Kong[J]. Separation Science and Technology, 2006, 41(7): 1253-1264.
- [3] 崔正国. 固定化和膜生物反应器技术处理海水冲厕污水初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 16-17.
- [4] 张雨山, 张秀芝, 王静, 等. 膜生物反应器处理冲厕海水的实验研究[J]. 膜科学与技术, 2010, 30(1): 73-77.
Zhang Yushan, Zhang Xiuzhi, Wang Jing, et al. Study on the treatment of seawater for toilet-flushing by MBR[J]. Membrane Science and Technology, 2010, 30(1): 73-77.
- [5] 李津, 于德爽, 王琪, 等. MBR 工艺处理含 50% 海水的污水实验研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(11): 1947-1950.
Li Jin, Yu Deshuang, Wang Qi, et al. Experimental study on treatment of wastewater containing 50% seawater by MBR process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(11): 1947-1950.
- [6] 李伟博. 膜生物反应器及生物载体强化海水养殖废水的脱氮机制研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2013: 10.
- [7] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 1-4.
- [8] 于令第, 李绍英. 含海水的废水 COD 的测定方法实验[J]. 环境保护, 1990(4): 20-22.
- [9] 崔有为, 王淑莹, 孔祥智, 等. 活性污泥处理系统抗盐度冲击的能力[J]. 中国给水排水, 2003, 19(11): 12-15.
Cui Youwei, Wang Shuying, Kong Xiangzhi, et al. Resistance to salinity shock in activated sludge treatment system[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(11): 12-15.
- [10] Bernet N, Delgenes N, Akunna J C, et al. Combined anaerobic-aerobic SBR for the treatment of piggery wastewater[J]. Water Research, 2000, 34(2): 611-619.
- [11] 徐亚明, 吴浩汀. 气水比回流比及冲击负荷对 BAF 的影响[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(6): 47-49.
Xu Yaming, Wu Haoting. Impact of gas and water ratio, backflow ratio and flushing load on biological aerated filter[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 27(6): 47-49.
- [12] 封莉, 张立秋, 吕炳南. 污泥浓度对膜生物反应器运行特性的影响研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(3): 307-340.
Feng Li, Zhang Liqiu, Lü Bingnan. Effect of sludge concentration on operational characteristics of membrane bioreactor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(3): 307-340.
- [13] Stephenson T, Simon J, Bruce J. 膜生物反应器污水处理技术[M]. 张树国, 李咏梅, 译. 北京: 化学工业出版社, 2003: 23-41.
- [14] Reid E, Liu X R, Judd S J. Sludge characteristics and membrane fouling in full-scale submerged membrane bioreactors[J]. Desalination, 2008, 219(1/2/3): 240-249.

(责任编辑: 吕海亮)