

SMBR 处理城市污水的同步脱氮除磷研究

杨 利^{1,2}, 魏春海¹, 黄 霞¹, 王宝泉²

(1. 清华大学 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 通过对一体式膜生物反应器 (SMBR) 中试系统操作条件的调控, 探讨了该装置在处理典型城市污水时的同步脱氮除磷功能。由于反应器具有不同的溶解氧分区, 导致菌胶团内部同时存在好氧、缺氧、厌氧的微环境, 使系统具有一定的同步脱氮除磷功能。试验结果表明, 在曝气量为 $14.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、水力停留时间为 4.5 h 、污泥浓度为 8.0 g/L 时, 出水 COD 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002), 对总氮的平均去除率为 45.6% , 对总磷的平均去除率为 43.1% 。同时发现由过高的污泥浓度造成的溶解氧不足, 是导致 SMBR 对氨氮去除效果不佳的主要因素。

关键词: 一体式膜生物反应器; 中试; 城市污水; 脱氮除磷; 溶解氧; 气升式内循环反应器

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2006)11-0013-05

Pilot Study on Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal in Submerged Membrane Bioreactor Treating Municipal Wastewater

YANG Li^{1,2}, WEI Chun-hai¹, HUANG Xia¹, WANG Bao-quan²

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The potential of simultaneous nitrogen and phosphorus removals in a SMBR treating typical municipal wastewater was investigated by adjusting its operational parameters. Due to the structural characteristics of the bioreactor, there are zones with different dissolved oxygen concentrations. Thus aerobic/anoxic/anaerobic micro-environment in sludge flocs appears at the same time, resulting in the occurrence of simultaneous nitrogen and phosphorus removals. The results show that COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the effluent satisfy the *Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Water Consumption* (GB/T 18920 - 2002) when aeration rate is $14.5 \text{ m}^3/\text{h}$, HRT is 4.5 h and MLSS is 8.0 g/L . At the same time, the removal rates of TN and TP are 45.6% and 43.1% respectively. Additionally, it has been found that the lack of dissolved oxygen caused by high MLSS is the main factor for the low removal rate of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$.

Key words: submerged membrane bioreactor; pilot-scale test; municipal wastewater; nitrogen and phosphorus removal; dissolved oxygen; airlift internal-loop reactor

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2005AA601030)

膜生物反应器 (MBR)作为一种新型、高效的污水处理与回用工艺,具有出水水质稳定优良、占地面积小和剩余污泥产量少等优点^[1]。同时,由于膜的高效泥水分离作用,MBR内的污泥浓度一般较高,在一定的曝气条件下,容易使菌胶团形成表面好氧、内部缺氧甚至厌氧的微环境,使得同步脱氮除磷成为可能^[2,3]。从一体式膜生物反应器 (SMBR)的结构特点来看,由于只在升流区内进行曝气,在适当的污泥浓度和曝气条件下,反应器内有可能同时存在好氧、缺氧甚至厌氧区域^[4],这同样为同步脱氮除磷提供了可能,但关于这方面的研究报道尚不多见。为此,考察了处理典型城市污水的 SMBR 中试装置在不同操作条件下的运行效果,在确保出水水质符合回用水标准的同时,探讨了该装置同步脱氮除磷的潜力。

1 材料和方法

1.1 试验装置

SMBR中试系统的流程如图 1所示。

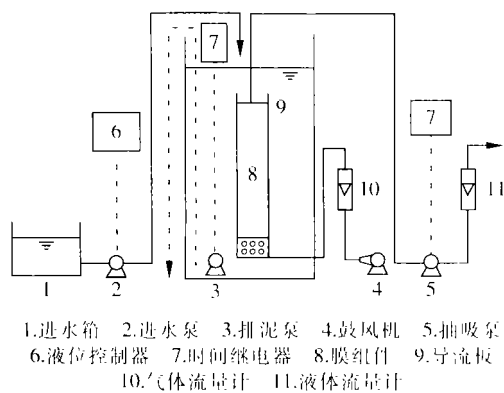


图 1 SMBR 中试系统

Fig 1 Schematic diagram of SMBR pilot system

生物反应器的长×宽×高=1.0 m×0.8 m×2.8 m,有效容积为 1.82 m³。膜组件采用聚乙烯帘式中空纤维膜。

原水取自北京城市排水集团清河污水处理厂的曝气池配水井,由水泵提升进入 SMBR。鼓风机通过曝气管向生物反应器内供氧并形成气、水两相流动以控制膜污染,采用抽吸泵抽吸出水。进水泵的运行由液位计自动控制,以保持生物反应器内液位基本稳定;抽吸泵由时间继电器控制间歇运行。

生物反应器在空间上被两块导流板分为升流区和降流区,其面积分别为 0.13 m²和 0.61 m²。升流区气含率较高,属好氧区;降流区由于面积相对较

大,其内部可形成较大范围的缺氧区,在降流区底部还会存在一定的厌氧区,如图 2所示。

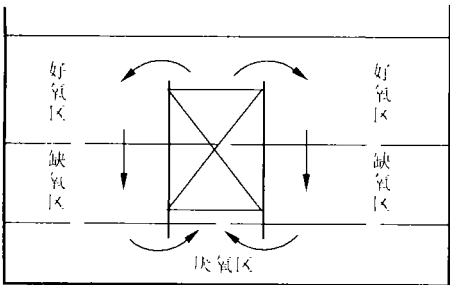


图 2 生物反应器中的氧分区

Fig 2 Sub-zones of dissolved oxygen in bioreactor

1.2 原水水质、测定项目及方法

共进行了 6个工况的试验,运行期间原水水质见表 1。

表 1 原水水质

Tab 1 Raw wastewater quality mg·L⁻¹

工况	COD	NH ₄ ⁺ - N	TN	TP
1	199.5	29.1	31.7	7.3
2	272.8	32.2	34.4	5.5
3	253.2	44.0	52.3	7.1
4	326.1	38.8	48.6	6.1
5	331.7	44.5	56.8	6.3
6	390.8	52.7	53.6	6.7

进、出水中的 COD、NH₄⁺ - N、TN、TP以及混合液污泥浓度 (MLSS),采用《水和废水监测分析方法》中的标准方法进行测定;混合液中溶解氧 (DO)的测定使用 Orion Models 810Aplus便携式溶解氧仪。

1.3 运行条件

各工况的运行参数见表 2。

表 2 各工况的运行参数

Tab 2 Operational parameters under different conditions

工况	运行时间/d	水温/℃	曝气量/(m ³ ·h ⁻¹)	SRT/d	HRT/h	MLSS/(g·L ⁻¹)
1	1~14	26~27	21.0		5.5	2.9~14.2(8.9)
2	15~36	24.5~29	21.0	11	5.5	4.2~12.0(8.2)
3	37~50	25~26	14.5	11	5.5	6.4~9.3(7.8)
4	51~70	24~26	14.5		4.5	6.4~14.3(9.0)
5	71~87	20~23.5	14.5	11	4.5	6.8~12.2(8.0)
6	88~104	22~23	14.5	5	5.0	3.0~5.1(4.1)

注: 括号内数值为平均污泥浓度。

各工况运行参数的选择以各工况的实际运行情况为参考,首先从能保证出水水质符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)

出发,根据前一工况的运行效果动态调整下一工况的运行参数,从而在较短的时间内,通过对有限工况运行效果的对比,找出一个具有较优同步脱氮除磷能力的运行工况。

2 结果与讨论

2.1 对 COD 的去除效果

各工况下对 COD 的去除效果如图 3 所示。

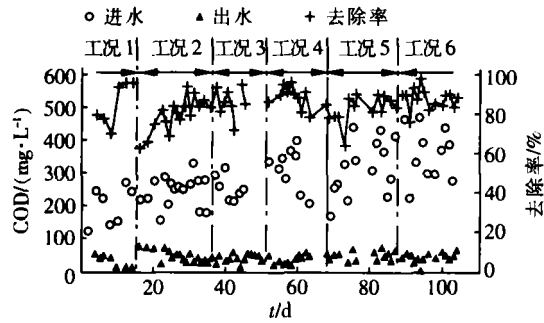


图 3 对 COD 的去除效果

Fig 3 Removal of COD under different conditions

工况 1~6 的进水 COD 平均浓度呈逐渐上升趋势,这是由季节变化引起的:夏季居民用水量较大,雨水也较多,导致有机物浓度较低;随着秋季的到来则用水量减少,而居民数量相对稳定,即产生的污染物总量变化不大,因此有机物浓度越来越高。各工况下的出水 COD 平均浓度依次为 29.6、46.4、39.0、37.6、49.6、43.5 mg/L,均低于 50 mg/L,符合 GB/T 18920—2002 的要求。各工况下对 COD 的平均去除率依次为 85.9%、81.1%、85.9%、86.8%、84.8%、87.9%。

试验中发现, SBR 系统对有机物的去除效果比较稳定,当进水 COD 浓度、曝气量、水力停留时间、污泥龄等因素在一定范围内变化时,对 COD 的去除率不会有太大波动。这是因为在 SBR 系统中,降解有机物的异养菌数量多,种类也丰富,适应不同环境变化的能力较强,同时膜对有机物也有一定的截留作用^[5],因此系统抗各种冲击负荷的能力较强。

2.2 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

各工况下对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率如图 4 所示。

由于季节的变化,进水氨氮浓度逐渐升高,这是以生活污水为主的城市污水的典型特征。各工况下的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度分别为 4.6、1.5、2.6、8.8、3.9、2.1 mg/L,均低于 10 mg/L,满足 GB/T 18920—2002 的要求。工况 4 的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度

较高是由于排泥系统发生故障未进行排泥所致。各工况下的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率分别为 84.5%、95.4%、94.8%、78.2%、91.8%、96.1%。

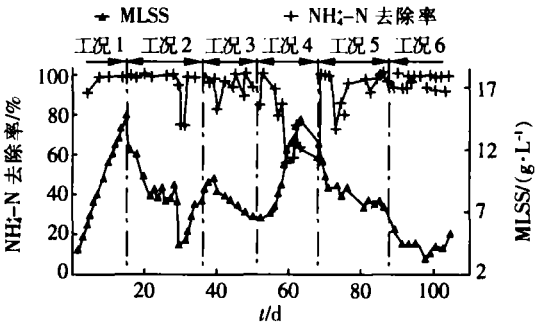


图 4 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

Fig 4 Removal of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ under different conditions

工况 4 由于缩短了水力停留时间且未进行排泥,导致污泥浓度持续升高,出水氨氮平均浓度较高,平均去除率较低。此时出水氨氮浓度的变化与混合液 MLSS 值的变化趋势相同,而去除率的变化趋势则与其相反,这说明污泥浓度是影响硝化效果的重要因素。虽然污泥浓度并不是影响硝化效果的直接原因,但混合液性状的改变会影响溶解氧的传质效率,同时过高的污泥浓度也会导致对溶解氧的需求量增加。J. Krampe 等发现:影响氧传质效率的边界层系数 (α) 随 MLSS 值的增加呈指数下降,即氧的传质效率随 MLSS 值的增加呈指数下降^[6]。Berthold Gunder 等在对 MBR 工艺中高污泥浓度下的传氧效率进行测定时也发现,在恒定的曝气量下,随着 MLSS 值的增加则氧的传质效率明显降低^[7]。

图 5 给出了各工况下生物反应器中溶解氧的分布情况。

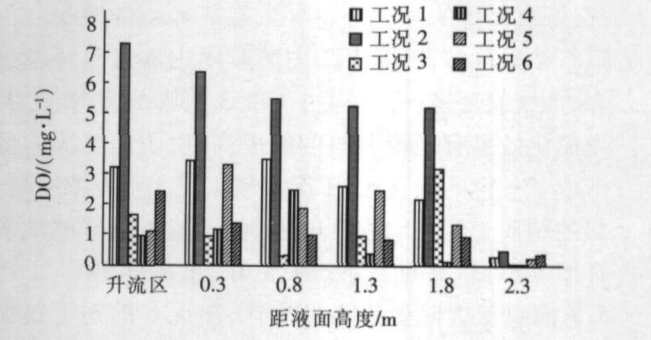


图 5 各工况下反应器中 DO 浓度的变化

Fig 5 Variation of DO in bioreactor under different conditions

从图 5 可见,相对于其他工况,工况 4 下生物反应器内各位置的 DO 浓度均较低:升流区的仅为 1 mg/L 左右,而降流区的大部分都在 0.5 mg/L 以下。

其污泥浓度在后期高达 14.3 g/L , 相对于其他工况也较高。这表明在相同的曝气量下, 污泥浓度过高会导致溶解氧浓度降低。而溶解氧浓度过低会对好氧的亚硝化细菌的活性产生明显的抑制, 从而导致对氨氮的去除率降低。

由 6 个工况下的运行结果可知, 当反应器中的污泥浓度为 $4 \sim 9 \text{ g/L}$ 时, $14.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的曝气量可在好氧、缺氧、厌氧交替出现的情况下营造出适当的好氧环境, 在菌胶团内形成足够的好氧区, 使硝化菌对城市生活污水达到很好的硝化效果, 对氨氮的去除率可达 95%; 溶解氧及污泥浓度引起的溶解氧剧烈变化是影响硝化效果的关键因素; 水力停留时间及污泥龄的小范围变化不会明显影响对氨氮的去除效果。

2.3 对 TN 的去除效果

后 4 个工况的进水总氮浓度较前两个工况的高, 变化范围为 $37.3 \sim 75.6 \text{ mg/L}$, 各工况下的出水总氮平均浓度分别为 $28.3, 34.0, 32.5, 26.3, 30.9, 42.6 \text{ mg/L}$, 平均去除率分别为 18.9%、1.9%、36.2%、44.8%、45.6%、18.8%。

工况 1、2 曝气量较高, 氧对菌胶团的穿透能力较强, 使其没有足够的缺氧区, 导致对总氮的去除效果很差。比较对氨氮处理效果可知, 同一时期硝化效果良好, 说明菌胶团内部好氧环境广泛。由于反应器中好氧、缺氧、厌氧环境交替出现, 因此不可能存在单一好氧或缺氧或厌氧的菌胶团, 在菌胶团内部不同的区域必定会存在不同状况的氧环境: 距表层一定厚度内为好氧环境, 内部可能存在缺氧区域, 同时也有厌氧环境存在的可能性。因此在菌胶团内部, 好氧环境的强化必将导致缺氧环境的减少。由运行结果可知, 工况 1、2 中菌胶团内部好氧环境过多, 而缺氧环境严重不足; 工况 3 将曝气量降低后, 反硝化效果有了较大幅度的提高, 说明菌胶团内部形成了一定的缺氧区; 工况 4 较工况 3 污泥浓度高, 氧的传质受到一定程度的限制, 营造了更好的缺氧环境, 故对总氮的去除效果更好; 正常排泥后, 工况 5 下的总氮去除效果未见恶化; 工况 6 缩短了污泥龄, 污泥浓度有大幅度的降低, 污泥浓度的降低引起了混合液中氧传质速率的上升, 恶化了反硝化菌的生存环境, 故此工况下的总氮去除效果较差。

2.4 对 TP 的去除效果

各工况下对 TP 的去除效果见图 6。

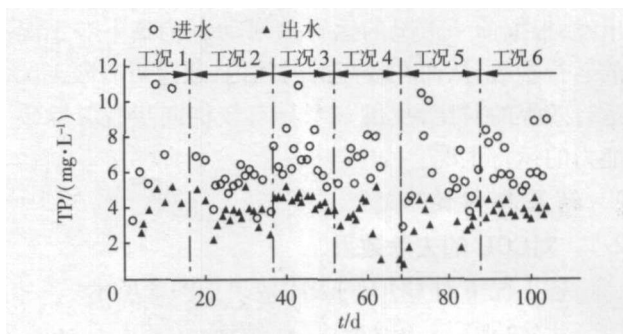


图 6 各工况下对 TP 的去除效果

Fig 6 Removal of TP under different conditions

进水总磷浓度在 $3.0 \sim 11.0 \text{ mg/L}$, 出水总磷平均浓度分别为 $4.1, 3.7, 4.5, 3.1, 3.4, 4.0 \text{ mg/L}$, 相应的去除率为 43.1%、30.6%、34.2%、51.3%、43.1%、38.6%。

工况 1 虽未进行排泥, 但仍有较强的除磷能力。这是由于污泥浓度的增加使得聚磷菌不断产生, 且随着 MLSS 值的升高则菌胶团内部的厌氧区域越来越大, 保证了聚磷菌对磷的充分释放, 为在好氧环境下的超量摄磷提供了基础。但对除磷来说, 不排泥是不可行的, 随着系统的运行, 聚磷与释磷将会达到平衡, 从而对磷没有去除率, 此时磷将随出水排出。工况 2 进行了正常排泥, 污泥浓度维持在合适的水平, 但曝气量较大, 菌胶团内部厌氧环境有限, 除磷效果有所下降。工况 3 较工况 2 的除磷效果稍好, 这是因为工况 3 降低了曝气量, 反应器中缺氧、厌氧区域增多, 菌胶团内部的厌氧区域也有所扩大, 从而有利于磷的去除。工况 4 的除磷能力升高原因与工况 1 的相似。工况 5 的水力停留时间有所缩短, 加上进水 COD 浓度的上升 (系统的有机负荷略有增大), 导致污泥浓度较工况 3 的有所升高, 使系统的厌氧环境得到了强化, 因此较工况 3 的除磷效果好。工况 6 虽然缩短了污泥龄并加大了排泥量, 但除磷效果并不比工况 5 的好, 这与同时期脱氮效果不如工况 5 的原因相似: 污泥浓度的降低有利于提高氧的传质效率, 使反应器中的 DO 浓度有所上升。

选取工况 5 中达稳定状态时的任意一天进行磷的衡算^[8], 一般认为活性污泥的化学式为 $\text{C}_{118}\text{H}_{170}\text{O}_{51}\text{N}_{17}\text{P}$, 则普通活性污泥中磷的含量为 1.1606%。此时系统的污泥含磷量保持稳定, 进入反应器中的 TP 通过出水与剩余污泥排出系统, 故对 TP 的去除效果由排出系统的增殖污泥所贡献。依据系统有效容积、HRT 及进水 TP 浓度, 可知进入反应器中的

TP 量为 62.34 g/d; 由系统的有效容积、SRT 及 MLSS, 可知排泥量为 1.32 kg/d, 若系统活性污泥为普通活性污泥, 则由排泥去除的 TP 量为 10.45 g/d, 即系统对 TP 的去除率为 16.8%, 这远比试验结果低, 说明反应器中确实存在生物除磷过程。

3 结论

① 正常情况下各运行工况的出水 COD、 NH_4^+ -N 浓度均符合 GB/T 18920—2002 的要求, 其中工况 5 (曝气量为 $14.5 \text{ m}^3/\text{h}$, HRT 为 4.5 h, MLSS 为 8.0 g/L) 具有较优的同步脱氮除磷能力, 对 TN 的平均去除率为 45.6%, 对 TP 的平均去除率为 43.1%。

② 在特定的 SBR 系统中, 通过操作条件的优化, 合理分配反应器中好氧、缺氧、厌氧区域, 进而优化菌胶团内部的氧环境, 可使系统具有较好的同步脱氮除磷功能。但过高的污泥浓度会造成溶解氧的不足, 这是导致氨氮去除效果不佳的主要因素。

参考文献:

- [1] 黄霞, 桂萍, 范晓军, 等. 膜生物反应器废水处理工艺的研究进展 [J]. 环境科学研究, 1998, 11 (1): 40 - 44
- [2] 邹联沛, 张立秋, 王宝贞, 等. MBR 中 DO 对同步硝化反硝化的影响 [J]. 中国给水排水, 2001, 17 (6): 10 - 14

- [3] He Shengbing, Zhang Zhenjia, Wang Baozhen, *et al*. Simultaneous nitrification and denitrification in MBR [A]. Proceedings of International Conference on Environmental Biotechnology [C]. Beijing, 2004
- [4] Wei Chunhai, Huang Xia, Wen Xianghua. Pilot study on municipal wastewater treatment by a modified submerged membrane bioreactor [A]. Proceedings of WA Conference 2005 [C]. Xi'an, 2005
- [5] 刘锐, 黄霞, 钱易, 等. 一体式膜生物反应器处理生活污水的中试研究 [J]. 给水排水, 1999, 25 (1): 1 - 4
- [6] Krampe J, Krauth K. Oxygen transfer into activated sludge with high MLSS concentrations [J]. Water Sci Technol, 2003, 47 (11): 297 - 303
- [7] Gunder B. Replacement of secondary clarification by membrane separation results with tubular, plate and hollow fibre modules [J]. Water Sci Technol, 1999, 40 (4 - 5): 311 - 320
- [8] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程 (下, 第 4 版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000

作者简介: 杨利 (1981 -), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制。

电话: 13811907026

E-mail: yanglidengni@sohu.com

责任作者: 黄霞

收稿日期: 2006 - 01 - 05

(上接第 12 页)

参考文献:

- [1] Laíné M, Vial D, Pierre Moulart. Status after 10 years of operation—overview of UF technology today [J]. Desalination, 2000, 131: 17 - 25
- [2] 许经纶. 微滤和超滤技术在澳门饮用水处理中的应用研究 [J]. 上海水务, 2002, 18 (4): 45 - 49
- [3] Owen G, Bandi M, Howell J A, *et al*. Economic assessment of membrane processes for water and wastewater treatment [J]. Membrane Science, 1995, 102 (15): 77 - 91
- [4] Gil Grozes. Enhanced coagulation: its effect on NOM removal and chemical costs [J]. JAWWA, 1995, 87 (2):

78 - 89.

- [5] Kerry James Howe. Effect of coagulation pretreatment on membrane filtration performance [D]. University of Illinois, 2001.

作者简介: 尹华升 (1979 -), 男, 湖南隆回人, 硕士研究生, 主要研究方向为膜法饮用水处理。

电话: (0731) 6738436

E-mail: yinhua620@163.com

收稿日期: 2006 - 02 - 17