

A²/O—膜生物反应器强化生物脱氮除磷中试研究

曹 斌¹, 黄 霞¹, 北中 敦², 杨瑜芳³, 杨德立³

(1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 东丽工业株式会社 水处理技术中心, 日本国; 3. 东丽纤维研究所 <中国>有限公司, 上海 200023)

摘 要: 将日本东丽株式会社生产的平板膜组件与 A²/O 工艺相结合, 构建了 A²/O—膜生物反应器 (A²/O—MBR) 强化生物脱氮除磷中试系统, 并用于处理城市污水。结果表明, 出水 COD、BOD₅、NH₃-N、TN 和 TP 的平均浓度分别为 24.9、2.54、0.68、14.3、0.98 mg/L, 满足我国《城市污水再生利用 景观环境用水水质》标准 (GB/T 18921—2002) 对氮和磷的要求, 并达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 B 标准。

关键词: A²/O; 膜生物反应器; 平板膜组件; 生物脱氮除磷; 再生回用

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2007)03-0022-05

Pilot Test on Enhanced Biological Nitrogen and Phosphorus Removal by Using A²/O - MBR

CAO Bin¹, HUANG Xia¹, Atsushi Kitanaka², YANG Yu-fang³, YANG De-li³

(1. Department of Environmental Science & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Water Treatment Technology Center, Toray Industries Inc, Japan; 3. Toray Fibers & Textiles Research Laboratories <China> Co Ltd, Shanghai 200023, China)

Abstract: By combining the plate membrane bioreactor from Toray Industries Inc with the A²/O process, a pilot test system for enhancing biological nitrogen and phosphorus removal by using the A²/O - membrane bioreactor (A²/O - MBR) was constructed and used to treat municipal wastewater. The results show that the effluent concentrations of COD, BOD₅, NH₃-N, TN and TP are 24.9 mg/L, 2.54 mg/L, 0.68 mg/L, 14.3 mg/L, and 0.98 mg/L respectively. Therefore, the quality requirements for phosphorus and nitrogen removal in the *Reuse of Urban Recycling Water* / *Water Quality Standard for Scenic Environment Use* (GB/T 18921 - 2002) are met, and I-B criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002) is achieved.

Key words: A²/O process; membrane bioreactor; plate membrane module; biological nitrogen and phosphorus removal; reclamation and reuse

膜生物反应器 (MBR) 是膜分离技术与传统活性污泥法有机结合而成的新型污水处理工艺, 因具有出水水质好、占地面积小和产泥率低等特点而在污水处理及回用中发挥着越来越重要的作用^[1]。随着水体污染的不断加剧, 许多国家都制定了更加严格的营养物排放标准以防止接纳水体富营养化的

进一步发生^[2], 如我国新修订的《城市污水再生利用 景观环境用水水质》标准 (GB/T 18921—2002) 和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 要求总氮 < 15 mg/L, 而最严格的总磷标准已达 0.5 mg/L。然而, 目前应用的 MBR 大多以去除有机污染物为主, 对 MBR 技术的研究重点也放在了

污染物去除机理和控制膜污染等方面^[3,4]。因此强化 MBR 工艺对氮和磷的同时去除,以满足再生水水质标准对氮和磷的严格要求就显得尤为迫切和重要。

传统的生物脱氮工艺通常采用前置反硝化或后置反硝化来实现对氮的去除,而设置了厌氧反应器、缺氧反应器和好氧反应器的 A²/O 工艺则可以实现同步除碳和脱氮除磷功效^[5~8]。由 A²/O 工艺与膜分离技术结合而成的具有同步脱氮除磷功能的 A²/O—MBR 工艺,可进一步拓展 MBR 的应用范畴,使 MBR 在城市污水再生利用中得到更广泛的应用。同时, A²/O—MBR 工艺高浓度的 MLSS 独立控制的水力停留时间 (HRT) 和固体停留时间 (SRT)、回流比及污泥负荷率等也会产生与传统 A²/O 工艺不同的影响,因而研究 MBR 脱氮除磷工艺及其影响因素具有十分重要的意义。

为此,将日本东丽公司生产的平板膜组件与 A²/O 工艺相结合,构建了能同时去除碳、氮和磷的 A²/O—MBR 工艺,并开展了处理城市污水的中试研究。

1 材料与方法

1.1 试验装置与流程

中试装置位于北京市北小河污水处理厂内,其工艺流程见图 1。

试验用水为该污水厂的初沉池处理出水,其 BOD₅、COD、NH₃-N、TN 和 TP 的平均浓度分别为 131、310、50、56、8.3 mg/L。原水由潜水泵提升后经

1 mm 细格栅流至 MBR 原水槽中,依次经过厌氧池、缺氧池和好氧池处理后流入 MBR 池,再经膜分离后得到处理水。

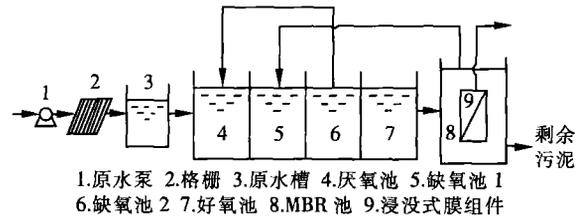


图 1 A²/O—膜生物反应器中试流程

Fig 1 Flow chart of A²/O - MBR process

在该工艺中设置了两个回流:一个是 MBR 池的混合液回流至缺氧池 1,用以实现反硝化脱氮;另一个是将缺氧池 2 内的混合液回流至厌氧池,目的是实现厌氧释磷。

1.2 膜组件

试验中在 MBR 池内安置了两组独立的膜组件 (25 片/组),以考察在不同膜通量下运行时膜污染的发生及发展情况。膜组件为 Toray 平板膜 (PVDF 材质),其有关性能参数见表 1。

表 1 Toray 平板膜组件的性能参数

Tab 1 Parameters of Toray plate membrane module

项目	孔径 / μm	长 /mm	宽 /mm	单片膜面积 / m^2
数值	0.08	1 500	500	1.4

1.3 操作条件

为优化生物脱氮除磷的操作条件,设计了 7 个工况,相应的试验条件如表 2 所示。

表 2 中试运行条件

Tab 2 Operation mode of A²/O - MBR process

工况	日期	HRT/h				SRT/d	回流比 / %	溶解氧 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
		厌氧池	缺氧池	好氧池	合计			
1	2005年 5月 16—6月 1日	6	12	6	24		200	2
2	2005年 6月 2日—21日	3.75	7.5	3.75	15		200	2
3	2005年 6月 22日—8月 16日	3	6	3	12		200	2
4	2005年 8月 17日—9月 10日	3	6	3	12	30	200	2
5	2005年 9月 11日—12月 12日	1.5	3	1.5	6	30	200	2
6	2005年 12月 13日—2006年 1月 6日	1.5	3	1.5	6	30	300	2
7	2006年 1月 7日—3月 11日	1.5	3	1.5	6	30	300	1

注: 回流比为 MBR 池至缺氧池 1 的回流比;溶解氧为好氧池内的溶解氧。

2 结果与讨论

2.1 MLSS 与污泥负荷的变化

各反应器内污泥浓度 (MLSS) 的变化如图 2 所

示。

由图 2 可知,当系统开始排泥后 MLSS 值逐渐降低;当 HRT 由 12 h 缩短至 6 h 后,污泥浓度开始

增长并逐渐达到稳态。运行后期 MLSS 出现了下降,经分析主要原因是:污泥过滤性能变差造成膜抽吸压力上升并超过自锁值,进而导致 MBR 出水出现了间歇性中断。

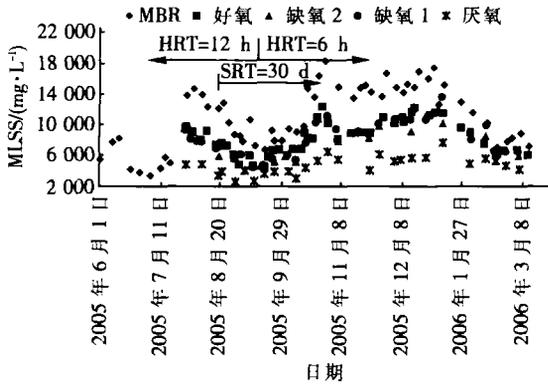


图 2 各反应器内 MLSS 浓度的变化

Fig 2 Variation of MLSS in different reactors with time

图 3 显示了整个试验期间生物反应器平均污泥负荷的变化。当 HRT = 12 h 时,污泥负荷为 0.072 ~ 0.098 kgCOD / (kgMLSS · d); 当 HRT = 6 h 时,污泥负荷为 0.091 ~ 0.306 kgCOD / (kgMLSS · d)。

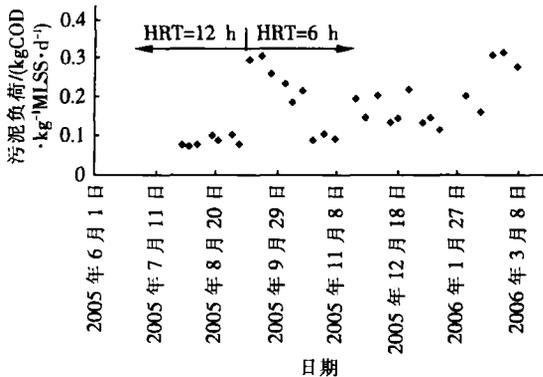


图 3 污泥负荷的变化

Fig 3 Variation of sludge load in reactor with time

2.2 对 COD 和 BOD₅ 的去除

图 4 和图 5 分别显示了 A²/O—MBR 工艺对 COD 和 BOD₅ 的去除情况。

检测显示平均出水 COD 为 24.9 mg/L, 平均去除率达 91.3%; 出水 BOD₅ 平均值为 2.54 mg/L, 相应的平均去除率达 97.7%。HRT 和 SRT 的调整与变化对有机污染物的去除影响不大, 说明 MBR 内的高浓度污泥可保证生物降解的稳定性。

由图 4 可知, 在运行后期上清液中的 COD 浓度明显升高, 这是由于经过长时间运行后产生了溶解

性微生物产物 (SMP) 积累所致, 由此导致出水 COD 浓度也有所升高, 但仍能保持在 50 mg/L 以下, 充分体现了高效的膜分离对保证系统出水水质稳定的作用。SMP 的主要成分为腐殖质、多糖和蛋白质, 其可生物降解性差, 有可能影响污泥活性, 并加剧膜污染^[9]。

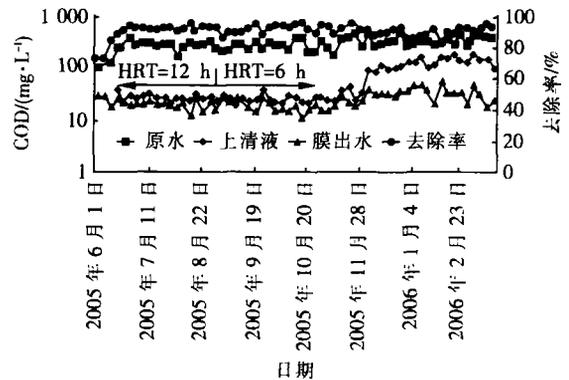


图 4 对 COD 的去除

Fig 4 Effect of COD removal

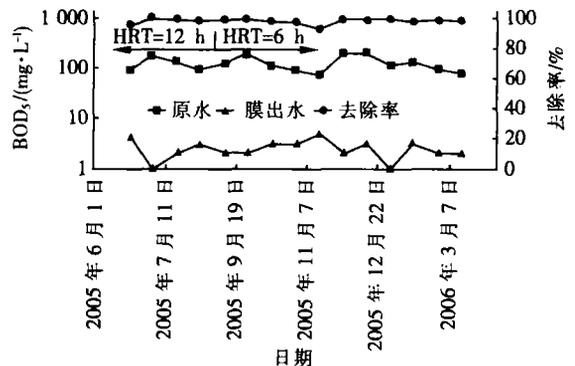


图 5 对 BOD₅ 的去除

Fig 5 Effect of BOD₅ removal

2.3 对 NH₃-N 与 TN 的去除

A²/O—MBR 工艺对 NH₃-N 和 TN 的去除效果分别如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 可以看出, A²/O—MBR 在长达 8 个多月的运行中, 均获得了很好的硝化和反硝化效果, 系统出水 NH₃-N 浓度平均为 0.68 mg/L, 相应的去除率达 98.6%; 出水 TN 浓度平均为 14.3 mg/L, 平均去除率为 74.4%。当 HRT 由 12 h 缩短至 6 h 后, 污泥负荷的增加并未对系统的硝化和反硝化效果产生影响, 其出水中的 NH₃-N 和 TN 浓度仍较稳定。此外, 将回流比由 200% 提高至 300% 有利于改善反硝化效果。

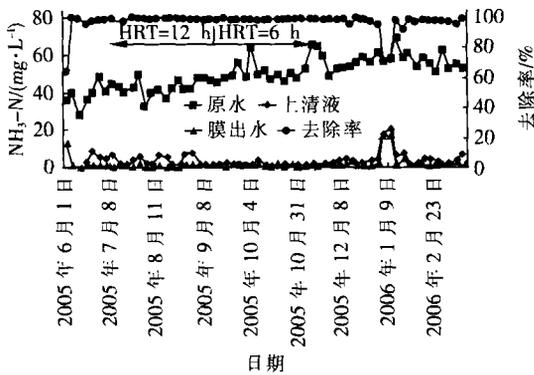


图 6 对 NH₃-N 的去除

Fig 6 Effect of NH₃-N removal

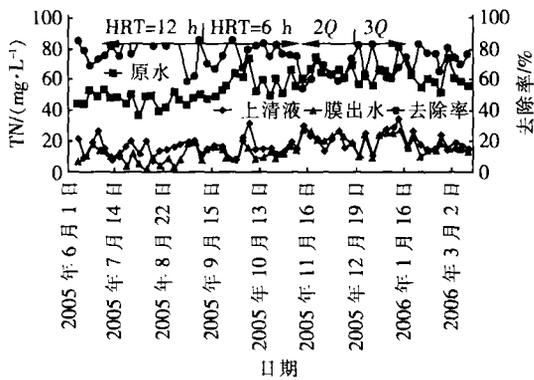


图 7 对 TN 的去除

Fig 7 Effect of TN removal

与其他季节的反硝化效率相比,冬季的有所降低。据报道,当温度由 20 降至 15 以下时,反硝化速率可降低一半左右^[10]。2006 年元月初系统出水 NH₃-N 和 TN 浓度增大的原因是变频鼓风机出现故障,导致系统的硝化效果变差。

2.4 对 TP 的去除

A²/O—MBR 工艺的除磷效果如图 8 所示。

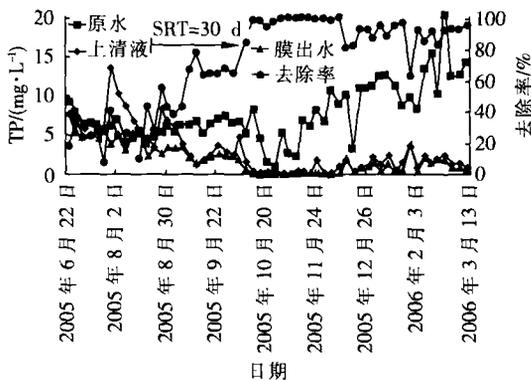


图 8 对 TP 的去除

Fig 8 Effect of TP removal

在不排泥的情况下,系统对 TP 的去除效果很差。当反应器中的生物量达到预期要求且开始按 SRT=30 d 排放剩余污泥后,对 TP 的去除率逐渐升高,出水 TP 浓度逐渐降低,生物除磷效果趋于好转。稳态出水的 TP 平均浓度为 0.98 mg/L,对其平均去除率达 88.4%。2005 年 10 月,北小河污水处理厂向其原水中投加了 PAC,造成 MBR 进水 TP 浓度下降。为消除此影响,从 10 月底开始在 A²/O—MBR 工艺的原水中人为地补充了正磷酸盐,并使 PO₄³⁻-P 浓度达到 3 mg/L 以上;在该污水厂停止投加 PAC 后,也随即停止向原水中投加正磷酸盐。

此外,在不调整缺氧池至厌氧池回流比的情况下,HRT 和 MBR 池至缺氧池回流比的改变并未对系统的生物除磷效果产生影响。

2.5 出水浊度

测定结果显示,随着运行时间的延长,出水浊度值逐渐减小并趋于稳定。运行初期,混合样(两膜组件出水以等体积混合)的浊度偏高,2 个多月后,由于膜孔被堵塞以及膜面滤饼层的形成(起到了再过滤的作用),出水浊度减小,其中膜组件 1 的平均出水浊度为 0.176 NTU,组件 2 的为 0.169 NTU,二者无明显差异。

2.6 各工况的平均出水水质

表 3 给出了各试验工况下的平均出水水质。

表 3 A²/O—MBR 工艺在各工况下的平均出水水质

Tab 3 Effluent quality in different operating stages

工况	COD / (mg · L ⁻¹)	TOC / (mg · L ⁻¹)	NH ₃ -N / (mg · L ⁻¹)	TN / (mg · L ⁻¹)	TP / (mg · L ⁻¹)	温度 /
1						30
2	26.0		0.27			28
3	20.3	9.02	0.59	9.23	5.07	27~35
4	22.5	13.9	0.31	9.53	2.94	28
5	20.6	11.6	0.33	16.3	0.75	14~27
6	34.9	15.6	1.33	13.4	0.98	14~17
7	33.2	17.5	1.27	16.9	1.28	13~19

由表 3 可知, HRT、SRT 及回流比等参数的变化对有机污染物的去除影响不大,但是当污泥混合液中产生 SMP 积累时会导致出水水质变差。在工况 6、7 下出水 NH₃-N 值升高主要是由于变频电机故障导致 DO 浓度不稳(使硝化效果变差)所致。HRT 的减少对反硝化的影响也不大,但随着冬季温度的

降低,出水 TN 值明显升高,尤其是当温度 < 15 时反硝化速率明显降低。另外,提高回流比可提供更多的碳源,有助于反硝化的进行。开始排泥后,出水 TP 浓度明显降低,稳态出水 $TP < 1 \text{ mg/L}$,在工况 7 下出水 TP 浓度升高是由于系统反硝化效果变差所致。当好氧反应器中的 $DO = 1 \text{ mg/L}$ 时,系统的硝化效果会受到轻微影响,导致出水 TN 浓度有所升高。

将 A^2/O -MBR 工艺的平均出水水质与我国《城市污水再生利用 城市杂用水水质》标准 (GB/T 18920—2002)、《城市污水再生利用 景观环境用水水质》标准 (GB/T 18921—2002) 和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 进行比较可知,稳态时的膜出水水质既可以达到城市杂用水水质标准,又能满足对氮、磷的排放要求 (磷可达一级 B 标准)。

3 结论

A^2/O -MBR 工艺实现了同步脱氮除磷功效,当 $HRT = 6 \text{ h}$ 和 $SRT = 30 \text{ d}$ 时出水水质稳定而优良,完全能够满足我国回用水水质标准的要求。

HRT 的变化对去除有机物、生物硝化反硝化和除磷效果的影响不大。

平板膜组件具有对污染物的截留能力强、出水浊度低和运行稳定等特点。

参考文献:

- [1] Tom S, Judd S, Bruce J, *et al*. Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment [M]. London: WA Publishing, 2000.
- [2] Lesjean B, Gnirss R, Adam C. Process configurations adapted to membrane bioreactors for enhanced biological

phosphorus and nitrogen removal [J]. Desalination, 2002, 149: 217 - 224.

- [3] Chang I S, Clech P L, Jefferson B, *et al*. Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment [J]. J Environ Eng, 2002, 128(11): 1018 - 1029.
- [4] Adham S, Gagliardo P, Boubs L, *et al*. Feasibility of the membrane bioreactor process for water reclamation [J]. Water Sci Technol, 2001, 43(10): 203 - 209.
- [5] Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. Modelling biological nutrient removal activated sludge systems—a review [J]. Water Res, 2003, 37: 3430 - 3444.
- [6] Vocks M, Adam C, Lesjean B, *et al*. Enhanced post-denitrification without addition of an external carbon source in membrane bioreactor [J]. Water Res, 2005, 39(14): 3360 - 3368.
- [7] Thomas P R, Allen D, McGregor D L. Evaluation of combined chemical and biological nutrient removal [J]. Water Sci Technol, 1996, 34(1 - 2): 285 - 292.
- [8] 张自杰. 排水工程 (下册) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] 刘锐, 黄霞. 膜—生物反应器中溶解性微生物产物的研究进展 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(1): 1 - 7.
- [10] Henze M, Harremoës P. 污水生物与化学处理技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

作者简介: 曹斌 (1965 -), 男, 河北望都人, 工学博士, 研究方向为膜法污水处理技术与应用。

E - mail: xhuang@tsinghua.edu.cn

责任作者: 黄霞

收稿日期: 2006 - 10 - 17

防止水源枯竭和水体污染, 保证城乡居民饮用水安全