

膜生物反应器技术的研究和应用展望

Prospects for Study and Application of Membrane Bioreactor Technology

17-19, 30

x703

何义亮 顾国维 (同济大学, 上海 200092)

He Yiliang Gu Guowei (Tongji University, Shanghai 200092)

摘要 膜生物反应器是将膜分离技术与生物处理工艺相结合而开发的新型系统。该文就膜生物反应器的特征、研究现状、不同形式反应器的技术参数与处理效果等,进行了综述。由于膜生物反应器具有明显的优点,故愈来愈受到人们的重视,成为研究的热点之一。膜生物反应器的研究和应用范围不断拓宽,有的已进入污水处理实用阶段。建议今后在开发适合于分离的特种膜方面,在膜组件形式、操作条件、清洗方式等对膜通量的影响方面,以及生物作用与膜分离工艺的相互影响机制等方面,进行深入研究。

关键词: 膜生物反应器 膜分离技术 生物处理工艺 处理效果 研究现状 应用前景 废水处理,

Abstract The membrane bioreactor (MBR) is a kind of new system which combined biological treatment process with membrane separation technology. In this paper a comprehensive discussion about the MBR was given, including the characteristics, the present status of study, the technological parameters and the treatment effect of different reactor models. Due to the obvious superiority of this technology, more and more importance is attached to it. The scope of study and application of MBR is widened continuously and in some areas it has been used practically. Some suggestions about further research were presented, including developing special membrane suitable for MBR, studying the influence of membrane model, operational condition and cleaning model to the membrane flux, and revealing the effect mechanism between biological action and membrane separation.

Key words: Membrane reactor Membrane separation technology Biological treatment process
Treating effect Present status of study Prospects for application

1 膜生物反应器的特征

膜生物反应器是将膜分离技术与生物处理工艺相结合而开发的新型系统。自 80 年代以来,该技术愈来愈受到人们的重视,成为研究的热点之一。总体上讲,膜生物反应器具有以下几个特征:

(1) 出水水质好。用超微滤膜组件取代二次沉淀池,可使生物反应器内获得比普通活性污泥法高很多的生物浓度,极大地提高了生物降解能力,经膜分离之后出水质量高,可达生活杂用水水质标准(CJ25.1-89)。

(2) 工艺参数易于控制。膜生物反应器内可以控制较长的 SRT,使世代时间较长的硝化菌得以富集,提高硝化效果。同时,膜分离技术使废水中的大分子难降解成分,在有限体积的生物反应器中有足够停留时间,从而达到较高去除率。

(3) 设备紧凑,占地少。由于生物反应器内污泥浓度高,容积负荷可大大提高;而且,一体式膜生物反应器还可使设备更加紧凑。

(4) 易于自动控制管理。膜分离单元不受污泥膨胀等因素的影响,易于设计成自动控制系统,便于管理。

2 膜生物反应器技术的研究现状

1969 年美国 Smith 首先报导了活性污泥法和超滤结合,处理城市污水的方法^[1],同年 Dorr-Oliver Inc 进行了膜生物反应器处理生活污水的研究,并申报了专利。1972 年,Shelf 等开始了厌氧型膜生物反应器的研究工作。进入 80 年代以来,随着膜的开发,膜生物反应器更具实用价值,研究也有了很大的进展,其内容大致可分为以下几方面: 1) 探索新的膜生物反应器形式,扩大其适用范围; 2) 探求合适的操作条件和工艺参数,尽可能提高膜组件的性能; 3) 降低处理工艺的电力消耗; 4) 进行机理及数学模型描述的研究; 5) 实用化装置的研制。

第一作者何义亮,男,1965 年生,1988 年兰州铁道学院毕业,副教授,现为同济大学在读博士生。

在膜生物反应器工艺组合方面,Hardt(1970)使用完全混合反应器和超滤工艺处理生活废水^[2],Grethlein(1978)利用厌氧消化池与膜系统处理生活污水^[3],1989年Yamamoto进行了将中空纤维膜丝直接置于曝气池的一体式膜生物反应器的研究^[4],1991年还进行了SBR工艺与中空纤维超滤膜组件构成的膜生物反应器处理制革废水研究^[5],Yuichi Suwa(1992)进行了活性污泥法加微滤膜生物反应器的脱氮研究^[6],Kh Krauth(1993)进行加压活性污泥法与超滤膜构成膜生物反应器的研究^[7]。

膜生物反应器的应用范围不断拓宽,Tonelli(1991)研制了处理汽车制造厂含油污水的膜生物反应器系统,Ronald(1994)研究了膜生物反应器处理含大量油脂及重金属的废水^[8],Ayahidenori等(1993)进行了厌氧膜生物反应器去除磷酸盐的研究,Hideki Harada(1994)等研究了厌氧消化器与板框型超滤组件组合处理高浓度有机颗粒废水^[9],M Kolega(1991)等研究了中空纤维微滤系统去除细菌、病毒的能力^[10],A Hogetsu(1992)等进行了固定床厌氧消化器与管式中空纤维组件组合处理羊毛清洗废水的研究^[11]。

在膜生物反应器的特征、膜通量影响因素及操作条件等方面,也有许多研究工作,S Chaize(1991)用完全混合生物反应器和板框膜组件系统处理生活污水,研究了污泥产量、稳态下悬浮固体浓度、SRT和HRT对膜生物反应器的影响等^[12],Boran Zhang(1996)等对膜生物反应器与传统活性污泥、在微生物种群、细菌活性的对比方面进行了研究^[13],C Chiemchaisri(1993)等研究了一体式膜生物反应器硝化菌数量、最大硝化速率及温度的影响^[14],W Y Kiat(1992)则进一步研究了中空纤维膜的纤维间污泥积累机制及最佳设计密度^[15],H Nagaoka(1996)等,对细菌胞外聚合物(EPS)及污泥粘滞度对膜过滤阻力的影响,进行了动力学分析^[16],V L Pillay(1992)等对微滤系统凝胶层形成过程、影响因素、条件控制及模型预测进行了研究^[17],K H Choo(1996)等则对厌氧消化液组分对膜渗透性能的影响进行了研究^[18],Yamamoto(1989)的试验,证明了采用间歇抽滤和低压操作,可在很大程度上防止不可恢复的膜堵塞,并使能耗进一步降低,C Chiemchaisri(1992)等在一体式膜生物反应器内进一步增设了射流曝气装

置和叶片搅拌^[19],Tckeshi Sato(1981)则研究了膜通量与活性污泥浓度、溶解性COD、污泥粘度的动力学关系^[20]。

膜生物反应器有的已进入实用阶段,自1983~1987年,在日本已有13家公司采用膜生物反应器处理大楼废水,经处理后的水可回用,处理水量达50~250m³/d^[21],美国在Mansfield Ohi建造了一套处理规模为151m³/d的膜生物反应器系统,用于处理某汽车制造厂的工业废水^[22],英国也有用膜生物反应器处理有毒工业废水的实例^[23]。

我国关于膜生物反应器的研究起步较晚,华东理工大学林哲(1994)等,进行了完全混合曝气池与PE微孔过滤管系统处理模拟废水的研究^[24],清华大学钱易等(1995~1997),研究了平板超滤组件、无机陶瓷膜组件与活性污泥系统构成的膜生物反应器,以及中空纤维一体式膜生物反应器,处理生活污水的性能^[25~27],中科院生态研究中心樊耀波(1997)等,进行了膜生物反应器净化石油化工废水的研究^[28]。

3 膜生物反应器的形式、技术参数及处理效果

膜生物反应器从整体构造上看,是由膜组件和生物反应器两大部分组成。由于这两部分操作单元自身的多样性,膜生物反应器也必然有多种类型,膜组件部分有超滤(UF)和微滤(MF),膜过滤的压力驱动方式有加压型和抽吸型,生物反应器可分好氧和厌氧两大类,按组合方式来看,又可分为两大类,即分置式和一体式。分置式是指膜组件与生物反应器分开设置,超滤膜的压力驱动靠加压泵;一体式指膜组件安置在生物反应器内部,压力驱动靠真空泵抽吸。一体式中又有两种形式:一种是转盘式,即在生物处理槽内设置中空轴和圆板状膜,通过中空轴的旋转使轴上的膜也随之转动,形成错流型过滤;另一种是浸没式,即将中空纤维膜组件直接浸没于曝气池内,靠空气和水流的扰动来减缓膜污染。

不同形式膜生物反应器的技术参数及污水处理效果如表1。从表1可以看出,污泥浓度高、固体停留时间长、有机物去除率高、硝化效果好,是各类膜生物反应器的共同特点。但水通量低,动力消耗大,也使膜生物反应器的推广应用受到限制。

表1 不同形式膜生物反应器的技术参数及处理效果

系统形式	好氧分置式 ^[28]	好氧加压分置式 ^[7]	好氧抽吸分置式 ^[16]	好氧转盘一体式 ^[30]	好氧浸没一体式 ^[31]	好氧浸没一体式 ^[23]	厌氧分置式 ^[13]
HRT(h)	7.5	5.8	74.4~148.8		24	4	48~120
SRT(d)	5~20	6	41.7~175		(未排泥)	(未排泥)	65

续表

系统形式	好氧分 置式 ^[29]	好氧加压 分置式 ^[7]	好氧抽吸 分置式 ^[6]	好氧转盘 一体式 ^[30]	好氧浸没 一体式 ^[31]	好氧浸没 一体式 ^[32]	厌氧分 置式 ^[3]
MLSS(g/L)	4.3	10.9	14.8 ~ 24.7(MLVSS)	9.0			22.4
负荷(kg/m ³ ·d)	1.16(COD)	5.4(BOD ₅)	0.79 ~ 1.55(BOD ₅)			1.5(COD)	1.0 ~ 2.5(COD)
膜类型	UF	UF	MF	UF	UF	MF	UF
膜孔径或切割分子量	0.02	0.04	0.1	600000 ~ 1200000	0.03	0.1	3000000
膜结构	管式	管式		圆盘	中空纤维	中空纤维	平板
膜材料	陶瓷	PSF	PS	PS	聚乙烯	聚乙烯	PS
膜面流速(m/s)	3 ~ 4	2.53		2.6			0.8
平衡通量(m ³ /m ² ·h)	0.075	0.066	0.005 ~ 0.01	0.07	0.0046	3.36 × 10 ⁻⁵	0.04
工作压力(pa)		2.75 × 10 ⁵	<1.0 × 10 ⁵	<1.0 × 10 ⁵	0.26 × 10 ⁵	0.13 × 10 ⁵	0.5 × 10 ⁵
硝化率(%)	99.0	90.7	75.4 ~ 99.4	出水<5mg/L	90	>95	
有机物去除率(%)	96.0(COD)	99.8(COD)	99.0 ~ 99.6(TOC)	出水<5mg/L	80 ~ 98	>60	98
SS去除率(%)	>99.0	100	100	100	100		

4 建议

(1) 探讨分离活性污泥混合液与膜材质、孔径(切割分子量)、物化性能、孔隙等的关系, 开发适用于分离活性污泥混合液的特种膜。

(2) 研究膜组件形式、操作条件、清洗方式等对膜通量的影响, 并尽可能提高稳态通量, 增大系统处理能力。

(3) 研究生物作用与膜分离工艺的相互影响机制, 如曝气池容积与膜面积比, 污泥浓度与膜通量, SRT控制与污泥活性, HRT控制与溶解性有机物的积累, 膜面流速控制与能耗, 操作压力控制与系统稳定性等, 进而确定膜生物反应器的设计参数和工艺参数, 形成适用于膜生物反应器的设计体系。

(4) 解决由于加压泵循环引起的污泥活性下降及温度升高等问题, 并进一步降低动力消耗, 实现自动控制。

5 参考文献

- Smith Jr C V, et al. The use of ultrafiltration membrane for activated sludge separation. Presented Paper of 24 th Annual Purdue Industrial Waste Conference, 1969.
- Hardt F W, et al. Solid separation by ultrafiltration for concentrated activated sludge. J Wat Poll Control Fed, 1970, 42(12):2135.
- Grethlein H E. Anaerobic digestion and membrane separation of domestic wastewater. J Wat Poll Control Fed, 1978, 50:754.
- Kazuo Yamamoto, et al. Direct solid-Liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank. Wat Sci Tech, 1989, 21(4).
- Kazuo Yamamoto, et al. Tannery wastewater treatment using a sequencing batch membrane reactor. Wat Sci Tech, 1991, 23:1639.

- Yuichi Suwa, et al. Single-stage single-sludge nitrogen removal by an activated sludge process with cross-flow filtration. Wat Res, 1992, 26(9):1149.
- Krauth K, et al. Pressurized bioreactor with membrane filtration for wastewater treatment. Wat Res, 1993, 27(3):405.
- Ronald Zaloum, et al. Membrane bioreactor treatment of oily wastes from a metal transformation mill. Wat Sci Tech, 1994, 30(9):21.
- Hideki Harada, et al. Application of anaerobic-UF membrane reactor for treatment of a wastewater containing high strength particulate organics. Wat Sci Tech, 1994, 30(12):307.
- M Kolega, et al. Disinfection and clarification of treated sewage by advanced microfiltration. Wat Sci Tech, 1991, 23:1609.
- A Hogetsu, et al. High rate anaerobic digestion of well scouring wastewater in a digester combined with membrane filter. Wat Sci Tech, 1992, 25(7):341.
- S Chaige, et al. Membrane bioreactor on domestic wastewater treatment sludge production and modeling approach. Wat Sci Tech, 1991, 23:1591.
- Boran Zhang, et al. Seasonal change of microbial population and activities in a building wastewater reuse system using a membrane separation activated sludge process. Wat Sci Tech, 1996, 34(5 ~ 6):295.
- C Chiemchaist, et al. Biological nitrogen removal under low temperature in a membrane Separation bioreactor. Wat Sci Tech, 1993, 28(10):325.
- W Y Kiat, et al. Optimal fiber spacing in externally pressurized hollow fiber module for solid liquid separation. Wat Sci Tech, 1992, 26(5 ~ 6):1245.
- H Nagaoka, et al. Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process. Wat Sci Tech, 1996, 34(9):165.
- V L Pillay, et al. Cake formation in cross-flow microfiltration systems. Wat Sci Tech, 1992, 25(10):149.
- K H Choo, et al. Effect of anaerobic digestion broth com-

(下转第 30 页)

- 10 全国科技环保成果库. 含盐染料废水的流化焚烧及精盐回收装置. 重庆环境保护, 1987, 9(5): 59.
- 11 上海市经济委员会. 上海工业污染防治. 上海: 上海科技教育出版社, 1995, 247 ~ 249.
- 12 郑领英. 我国反渗透、超滤和微滤膜技术的现状. 水处理技术, 1995, 21(1): 1 ~ 6.
- 13 张夏亭. 有机磷农药含盐废水物化处理法: 中国专利公开号 CN1054053A, 1991.
- 14 四川省盐务局设计研究所. 电渗析法浓缩卤水中型试验. 海水脱盐, 1977, 7(1): 25 ~ 43.
- 15 Hart O O et al. The treatment of industrial effluents with high salinity and organic contents. Desalination, 1987, 67:395 ~ 407.
- 16 徐协卿. 用透析法处理含酸或含盐废水. 电镀与环保, 1983, 6(3): 11 ~ 14.
- 17 Voortman W J et al. Application of electrochemical membrane processes to the treatment of aqueous effluent streams. Water Science Technique, 1992, 25(10):329 ~ 337.
- 18 Katsuyuki Otsuka. Electrolytic treatment of radioactive liquid waste to remove sodium. US4, 931, 153, 1990.
- 19 唐希文. 湿式空气氧化法治理特殊钢酸洗废液的新工艺. 环境杂志, 1982, 3(4): 10 ~ 20.
- 20 Hautala E. Calcium Carbonate in the removal of iron and lead from dilute waste water. Water Research, 1997, 11(2):243 ~ 245.
- 21 Vander Walt S R. The recovery of Fe, Mn and Al from a mine water effluent. Water Research, 1975, 9(10):865 ~ 868.
- 22 孙锡禄. 利用含铁盐酸废液生产液体 FeCl₃ 氧化剂. 上海环境科学, 1988, 7(2): 30 ~ 32.
- 23 Santoro L. Limestone neutralization of acid waters in the presence of surface precipitates. Water Research, 1987, 21(6):641 ~ 647.
- 24 北京大学. 含铁盐酸洗废液的处理方法. 中国专利公开号 CN85108552A, 1987.
- 25 曹家平. 利用硫酸酸洗废液生产氧化铁工艺. 环境污染与防治, 1984, 30(4): 36 ~ 38.
- 26 邹月飞. 利用工业酸洗 FeSO₄ 废液制取高纯氧化铁. 化工环保, 1989, 9(4): 226 ~ 228.
- 27 欧阳纶. 用酸洗废液合成铁氧体净化电镀废水研究. 环境化学, 1984, 3(6): 59 ~ 61.
- 28 潘沼光. 利用皂化废液生产 Na₂CO₃ 方法. 中国专利公开号 CN1040772A, 1990.
- 29 黄卓林. 酸洗废液中回收铁红和硫酸的方法. 中国专利公开号 CN87103373A, 1988.
- 30 Seppanen H T. Experiences of biological iron and manganese removal in Finland. J. IWEM, 1992, 6(6):333 ~ 341.
- 31 Vachon D T. Removal of iron cyanide from gold mill effluent by ion exchange. Water Science Technique, 1985, 17(2/3):313 ~ 324.

责任编辑 蒋瑞琴 (修改稿收到日期: 1997—12—28)

(上接第19页)

- position on membrane permeability. Wat Sci Tech, 1996, 34(9):173.
- 19 C Chiemchaisri, et al. Organic stabilization and nitrogen removal in membrane separation bioreactor for domestic wastewater treatment. Wat Sci Tech, 1992, 25(10):231.
 - 20 Takeshi Sato, et al. Effects of activated sludge properties on water flux of ultrafiltration membrane used for human excrement treatment. Wat Sci Tech, 1991, 23:1601.
 - 21 刘福谅等. 超滤技术在环境工程中的应用现状. 环境化学, 1993, 12(6): 490.
 - 22 樊耀波等. 水与废水处理中的膜生物反应器技术. 环境科学, 1996, 16(5): 79.
 - 23 岑运华. 膜生物反应器在污水处理中的应用. 水处理技术, 1991, 17(5).
 - 24 林哲等. 膜分离活性污泥法的研究. 城市环境与城市生态, 1994, 7(1): 6.
 - 25 黄霞, 钱易等. 膜—活性污泥组合工艺的污水处理特性研究. 资源、发展与环境保护(第三届海峡两岸环境保护学术研讨会论文集), 1995, 95.
 - 26 汪城文, 钱易等. 膜—好氧生物反应器处理生活污水的试验研究. 给水排水, 1996, 22(12): 18.
 - 27 邢传宏, 钱易等. 无机膜—生物反应器处理生活污水试验研究. 环境科学, 1997, 18(3): 1.
 - 28 樊耀波等. 膜生物反应器净化石油化工污水的研究. 环境科学学报, 1997, 17(1): 68.
 - 29 Xiao-Jun Fan, et al. Nitrification and mass balance with a membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. Wat Sci Tech, 1996, 34(1 ~ 2):129.

- 30 张志诚等. 超滤技术研究与应用. 北京: 海洋出版社, 1993, 175.
- 31 C Chiemchaisri, et al. Household membrane bioreactor in domestic wastewater treatment. Wat Sci Tech, 1993, 27(1):171. 责任编辑 杨泽生 (收稿日期: 1997—11—10)

(上接第13页)

- pentose nucleic acid and pentose nucleic acid in tissue from the nervous system. Biochem J, 1952, 51:480.
- 8 Borenfreund E, and Puerner J A. A simple quantitative procedure using monolayer cultures for cytotoxicity assays (htd/nr-90). J Tiss Cult Meth, 1984, 9:7 ~ 9.
 - 9 肖广庆, 唐任赛等. 放射示踪法研究结合稀土的四膜虫膜蛋白 II 键结合膜蛋白的性质. 同位素, 1990, 3: 142 ~ 148.
 - 10 Yang X D, X T Liu, et al. Hemolysis induced by the lanthanides and the entry of the lanthanides into erythrocyte. Beijing: Proceedings of the First sino-dutch Workshop on the Environmental Behavior and Ecotoxicology of Rare Earth Elements, 1996, 205 ~ 213.
 - 11 Bayer M E, and Bayer M H. Lanthanide accumulation in the periplasm space of *escherichia coli* B. J Bacteriol, 1991, 173: 141 ~ 149.
 - 12 黄仲贤, 郑起等. 稀土元素与金属硫蛋白作用的研究. 高等学校化学学报, 1996, 17: 190 ~ 192.
 - 13 Sholkovitz E R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. Aquatic Geochemistry, 1995, 1:1 ~ 34.

责任编辑 杨泽生 (收稿日期: 1997—12—19)