

膜生物反应器在我国的研究发展展望

孟凡生, 王业耀

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要 概述了膜生物反应器(MBR)的研究发展历史,指出污水回用和难降解有机废水的处理是 MBR 在我国推广应用的重要方向,总结 MBR 在我国污水回用和难降解有机废水处理中研究及其应用现状。对阻碍 MBR 推广应用的因素进行简单讨论,对 MBR 研究发展方向进行了展望。

关键词 膜生物反应器(MBR); 污水处理; 污水回用; 有机废水

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2005)04-0001-03

Prospects of the research on membrane bioreactor in China

MENG Fan-sheng, WANG Ye-yao

(Chinese research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract The research and development of membrane bioreactor(MBR) were reviewed. It was presented that the reuse of wastewater and the treatment of hardly degradable organic wastewater were both important aspects for the application of MBR in our country, and the progress of the research and present application of MBS to both aspects were discussed. Factors impeding the application of MBR were discussed briefly, and the trend of MBR development was viewed.

Key words membrane bioreactor(MBR); wastewater treatment; wastewater reuse; organic wastewater

膜生物反应器(Membrane Bioreactor,简称 MBR)是将高效膜分离技术和生物反应器的生物降解作用集于一体的生物化学反应系统。它使用膜组件替代传统活性污泥法中的沉淀池实现泥水分离,从而对废水进行处理,具有固液分离率高、出水水质好、处理效率高、占地空间小、运行管理简单等特点。目前,MBR 已成功用于下水道污水、粪便污水、垃圾渗滤液等生活废水的处理,在工业废水处理中研究日益增多。

1 MBR 研究发展历史

MBR 技术起源于 20 世纪 60 年代的美国,其商业应用已有 20 年的历史。MBR 的研究与应用可分为 3 个不同的发展时期:1966~1980 年、1980~1995 年以及 1995 年~至今^[1]。

1966 年,MBR 最先在美国出现,主要用来处理城市污水。Dorr oliver 公司首先将 MBR 用于废水处

理的研究,1968 年 Smith 等将好氧活性污泥法与超滤膜相结合的 MBR 用于处理城市污水,1969 年 Budd 等的分离式 MBR 技术获得了美国专利。20 世纪 70 年代初期,好氧分离式 MBR 和厌氧 MBR 的实验室研究与中试研究均取得了较满意的结果。由于受膜生产技术的限制,直到 20 世纪 70 年代后期,大规模好氧 MBR 才开始在北美应用。

20 世纪 70 年代末期,MBR 在日本迅速发展,主要集中于中水回用。1983~1987 年,日本有 13 家公司使用好氧 MBR 处理大楼废水,经处理后的水作为中水回用。日本 1985 年开始的“水综合再生利用系统 90 年代计划”把 MBR 的研究在污水处理对象与规模方面都大大推进了一步。

20 世纪 90 年代中后期,MBR 在欧洲和我国得到发展,其处理对象亦从生活污水扩展到工业废水。近年来,MBR 在我国已经进入了实用化阶段。其处理对象从生活污水扩展到高浓度有机废水和难降解

工业废水、制药废水、化工废水、食品废水、屠宰废水、烟草废水、豆制品废水、粪便污水、黄泥污水等^[1]。

2 MBR 在污水处理中的研究进展

近年来,MBR 的研究主要包括两方面:① MBR 处理效果的研究;② 对于膜污染防治问题的研究。从近年以及目前的发展趋势来看,污水回用和难降解有机废水的处理是 MBR 在我国推广应用的重要方向。

2.1 污水回用

MBR 中膜组件具有良好的固液分离效果,可使其保持较高的生物量和较长的污泥龄,具有较强的生化降解能力,处理出水中的 COD_{Cr} 、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、浊度均达到或优于城市杂用水水质标准或工业回用水指标要求。

付婉霞等^[3]采用一体式 MBR 处理高校学生宿舍盥洗废水。试验证明,无论进水水质如何变化,均能得到优质而稳定的膜过滤出水,符合生活杂用水水质标准。鲍建国等^[4]用一体式 MBR 处理港口污水,系统稳定后出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}}) < 40 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) < 5 \text{ mg/L}$, 浊度 $< 1.5 \text{ NTO}$, $\rho(\text{油}) < 5 \text{ mg/L}$, 出水中 SS 和大肠杆菌均未检测到,且无臭,无不快感,处理后的出水水质达到 CJ25.1—89《生活杂用水水质标准》中水回用水水质标准,可直接回用于港口绿化、冲洗车辆及洒水降尘。常颖等^[5]采用复合式 MBR 进行了小区污水处理和回用的试验研究,结果证明污水中 COD_{Cr} 、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的平均去除率分别为 94.5%、99.3%、99.4% 和 84.7%,出水满足 CJ25.1—89《生活杂用水水质标准》,经消毒后可用于小区绿化、冲厕、扫除、洗车等场合。徐元勤等^[6]采用规模为 $40 \text{ m}^3/\text{d}$ 的 MBR 对城市污水处理回用进行了试验研究,结果表明:MBR 具有较强的抗冲击负荷能力,活性污泥对污染物的去除起主要作用,膜分离对维持稳定的出水起重要作用,MBR 出水稳定,水质良好,优于生活杂用水水质标准。宁平等^[7]用 MBR 处理餐饮废水,经处理后,出水达到 CJ25.1—89《生活杂用水水质标准》,实现了水资源的循环再利用。樊耀波等^[8]采用中空纤维超滤 MBR,以好氧分离的运行工艺净化石油化工污水,结果表明:经 MBR 处理后,污水中 BOD_5 、SS、浊度去除率均高于 98%, COD_{Cr} 去除率平均为 91%,且工艺系统水处理效率保持稳定,污水净化后水质浊度低,无异味,宜于回用。彭若梦等^[9]用 A/O-MBR 处理炼油废水并回用,出水水质达到 GB 50050—1995《循环冷却水的水质标准》的指标要求,在进水 COD_{Cr} 质量浓度波动很大的情况下,出水 COD_{Cr} 质量浓度始终保

持在 40 mg/L 以下,且平均去除率达 94%,系统具有良好的脱氮效果和较强的抗 $\text{NH}_3\text{-N}$ 冲击负荷能力。贾海涛等^[10]用 MBR 对电镀厂废水进行了处理,实验表明:出水中几乎无悬浮物和浊度,对有机物和含氮化合物的去除效率很高,水质良好,符合 CJ25.1—89《生活杂用水水质标准》,整个系统具有较强的抗冲击负荷能力。

可以看出,用 MBR 对生活污水和某些工业废水处理,完全可以达到回用标准,且具有较强的抗冲击负荷能力。目前国内面临着水资源紧缺的问题,许多城市不得不采取限量供水和超量用水加倍收费等措施,因此中水回用对于合理用水和节约水资源势在必行。MBR 用于中水回用具有明显的竞争优势,具有良好的环境效益和经济效益^[2]。

2.2 难降解有机废水处理

MBR 对难降解废水表现出很强的处理能力。近年来 MBR 的研究已经从生活污水扩展到工业废水的处理,特别是一些难降解废水。

吴志超等^[11]采用分置式好氧 MBR 研究了对巴西氨酸生产废水的处理效果,结果表明:MBR 具有产泥量少、污泥活性好、能有效提高难降解有机物的去除效率等优点。韩怀芬等^[12]采用管式 MBR 处理造纸废液,原水 COD_{Cr} 质量浓度为 $900 \sim 1300 \text{ mg/L}$,通过混凝沉淀后进入反应器,出水可达一级排放标准。刘超翔等^[13]采用规模为 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右的一体式 MBR 对毛纺厂印染废水的处理进行了中试研究,实验结果表明:用此装置处理印染废水,出水水质稳定良好,明显优于该毛纺厂现有接触氧化处理工艺出水。沈树宝等^[14]利用自制仿生膜 MBR 处理农药废水,结果表明:好氧仿生膜 MBR 对农药废水有较好的处理效果,系统抗负荷冲击能力强,出水水质好,达到了国家污水综合排放一级标准。黄其明^[15]利用 MBR 处理制药发酵废水, COD_{Cr} 、 BOD_5 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率分别达到 98%、96% 和 98%。丁杭军等^[16]研究证明:MBR 用于处理医院污水在技术上是可行的,处理后出水优于 GBJ48—83《医院污水排放标准》。

有些学者研究了厌氧 MBR 对工业废水的处理效果。何义亮等^[17]采用厌氧 MBR 处理高浓度食品废水。在 COD_{Cr} 负荷较低时,膜出水 COD_{Cr} 去除率可达 90% 以上。当 COD_{Cr} 负荷在 $2 \sim 3 \text{ kg}(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,膜出水 COD_{Cr} 去除率在 80% ~ 90% 之间;当 COD_{Cr} 负荷超过 $4.5 \text{ kg}(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,膜出水 COD_{Cr} 去除率降至 70%,对 SS、色度及细菌的去除率分别可达 100%、98% 和 99.9%。管运涛等^[18]对造纸黑液配制废水进行处理。他们的研究都是基于 MBR 中膜的无选择性截留的特性,膜组件使反应器内活性污泥一直

保持高水平,提高了处理效率,同时膜的截留作用使大分子有机物和难降解有机成分能在有限的生物反应器内有足够的停留时间,保证了出水的稳定性。

近年来也有学者将典型的 MBR 和 A/O 生物处理工艺结合起来,进一步提高 MBR 处理难降解废水的能力。据报道,该工艺用于处理毛染废水时比单纯的好氧 MBR 具有更高的脱色效率^[13]。另外,李春杰等将一体化序批式 MBR 按照 SBR 的序批式运行方式运行处理有毒难降解的焦化废水,在一池内按照“缺氧—好氧”或“缺氧 1—好氧—缺氧 2”的工况运行,取得了很好的处理效果^[19]。

近年来虽然 MBR 在工业废水处理方面取得了一些成果,但也面临着参数不确定、成本高等问题,所以应该进一步研究。MBR 与传统污水处理技术的有机结合将会是今后研究的一个重点。由于 MBR 生物反应器仍采用传统的活性污泥法,有改进的必要和潜力,比如采用一些新型污水处理工艺(如 A²/O 法、SBR 工艺、氧化沟或生物膜法等),达到进一步提高 MBR 处理效率的目的。

3 展望

MBR 在我国水处理领域取得迅速发展,但在发展过程中面临着阻碍其推广应用的难题。研究人员应当对这些难题进行深入的研究和改进,从而有利于 MBR 在污水处理中推广应用。

a. 开发低成本、高性能的耐污染、高通量膜。膜的成本高、寿命短、易受污染,是影响 MBR 能否推广应用的重要因素,是 MBR 应用的“瓶颈”。目前实际应用的膜材料包括有机膜和无机膜。有机膜易污染、堵塞,只能在低温、低压下操作。现在已研制出聚酰胺系列、聚丙烯酰胺系列等有机膜及耐高温、耐高压的无机膜。近年来的研究表明,仿生膜能很好地解决传统膜许多难以克服的缺点,具有极好的传递性、分离性、选择性和生物相容性,所以人们开始着手于仿生膜的制备研究。

b. 结合 MBR 与传统污水处理技术,开发新型 MBR。MBR 与传统污水处理技术的有机结合将会是今后研究的一个重点。虽然膜技术的引入是 MBR 的一大优势,但其生物反应器仍采用传统的活性污泥法,还有改进的必要和潜力。根据不同的水质及处理要求,用不同的膜及膜组件与各种好氧和厌氧生物废水处理技术相结合,开发出处理能力更强、耐污染能力更强、运行更经济的新型 MBR,如用于重金属污染废水、有毒或难降解的有机工业废水、垃圾渗滤液的处理等,以扩大 MBR 研究应用的领域。

c. 确定 MBR 设计规范和操作参数。任何成熟

的工艺都有一套相对详细的设计规范和操作参数。目前,MBR 的研究发展迅速,但国内外 MBR 的工艺设计尚未见有较成熟、系统的方法,有必要确立一套合理的设计方法、操作参数以及检测标准。在 MBR 运行过程中,适宜的运行参数是 MBR 能否成功的关键。

d. 研究提高 MBR 经济可行性。MBR 工艺的发展不仅取决于工艺本身,而且很大程度上取决于其经济可行性,有必要对 MBR 的经济性进一步研究,以确定 MBR 适宜的处理规模。目前国内外,尤其是在国内的经济水平、膜产品供应状况和规范设计要求的条件下,确定 MBR 用于污水处理的最大经济流量是一个亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] 崔丽英,杨成永,武红霞. MBR 在水处理中的应用与发展[J]. 山西建筑, 2003, 29(18): 103~104.
- [2] 郑祥,刘俊新. 膜生物反应器的技术经济分析[J]. 给水排水, 2002, 28(3): 105~108.
- [3] 付婉霞,李蕾. 膜生物反应器处理盥洗废水运行参数的选择[J]. 北京建筑工程学院学报, 2002, 18(2): 22~25.
- [4] 鲍建国,卢学实. 一体式膜生物反应器处理港口污水及回用[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9): 37~38.
- [5] 常颖,王宝贞,高欣. 复合式膜生物反应器的小区污水回用试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(2): 152~156.
- [6] 徐元勤,丛广治,刘德滨,等. 膜生物反应器用于城市污水处理与回用的试验研究[J]. 膜科学与技术, 2003, 23(3): 46~48.
- [7] 宁平,王宏,周旭. 餐饮废水膜-生物反应器[J]. 膜科学与技术, 2002, 22(1): 36~38.
- [8] 樊耀波,王菊思,姜兆春. 膜生物反应器净化石油化工污水的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 68~74.
- [9] 彭若梦,王艳. A/O 膜生物反应器处理炼油废水并回用[J]. 中国给水排水, 2002, 18(8): 78~80.
- [10] 贾海涛,杨开,贾之辉. 应用膜生物反应器处理电镀厂废水的研究[J]. 环境科学与技术, 2003, 26(2): 38~41.
- [11] 吴志超,王士芬,高廷耀. 膜生物工艺和活性污泥法处理巴西氨基酸生产废水的对比试验[J]. 中国给水排水, 2000, 16(3): 57~60.
- [12] 韩怀芬,金漫彤,黄玉柱,等. 膜生物反应器处理难降解有机废水研究[J]. 中国给水排水, 2002, 18(3): 40~43.
- [13] 刘超翔,黄霞,文湘华,等. 一体式膜-生物反应器处理毛染废水的中试研究[J]. 给水排水, 2002, 28(2): 56~59.
- [14] 沈树宝,陈英文,夏明芳,等. 仿生膜生物反应器处理高浓度有机农药废水的研究[J]. 工业水处理, 2003, 23(3): 40~43.
- [15] 黄其明. PW 膜-生物反应器法处理制药发酵废水[J]. 工业用水与废水, 2001, 32(5): 49~51.

(下转第 33 页)

滤(Nanofiltration, NF)在饮用水处理中呈现强劲的发展趋势^[17,18]。

新的 UF 膜可以通过物理吸附作用快速有效地去除水中的氯仿和四氯化碳,但吸附容量有限,被吸附的氯仿和四氯化碳能够快速脱附,有可能造成出水中氯仿和四氯化碳的浓度高于进水浓度。这一特性也说明 UF 膜可方便地再生。

RO 膜在去除水中氯仿和四氯化碳时存在截留和吸附-脱附两种机理,因此去除率不仅与膜材质有关,而且还受到原水浓度的影响。原水浓度高(氯仿质量浓度 > 100 μg/L)时去除率可达到 90%,浓度低时去除率也低甚至为负,如当氯仿质量浓度 < 5 μg/L 时,去除率为负^[19]。

NF 膜能使 Ames 试验呈阳性的水转为阴性,对 TOC 的去除率约为 90%,对可同化有机碳(Assimilate Organic Carbon, AOC)的去除率为 80%^[20,21]。

3 结 语

目前控制饮用水中 THMs 的方法中,使用替代消毒剂 and 消毒方法还存在着方方面面的问题,许多研究者也已证明消毒副产物增多的根源在于水源水有机污染的日益严重,导致消毒副产物前驱物含量的剧增,因此从源头着手来削减消毒副产物的生成量的新思路是可行的。从目前国外采用的各种方法看,有多种方法能比较有效地去除水中 THMs 前驱物,控制了 THMs 的生成。考虑技术经济及去除效果等问题,以臭氧-活性炭的组合工艺效果为佳。目前各种方法都有尚需完善之处,尤其是在使用这些方法时产生的一些副产物对饮用水的安全造成的影响,应用时的经济问题等,还需进行进一步研究。

参考文献:

[1] Philip C S. Control of disinfection by-product in drinking water [J]. Water Environment Research, 1998, 70(4): 727 ~ 734.

[2] Koivusalo M, Pukkala E, Vartiainen T, et al. Drinking water chlorination and cancer—a historical cohort study in Finland [J]. Cancer Causes Control, 1997, 8: 192 ~ 200.

[3] Daniel P A. A risk assessment approach to selecting a disinfection by-product control strategy [J]. AWWA, 18 ~ 22, 1992: 281 ~ 301.

[4] Trussell R R. Safety of water disinfection: balancing chemical and microbial risks [M]. Washington: International Life Sciences Institute Press, 1993. 319 ~ 343.

[5] Jun Wenli. Trihalomethanes formation in water treated with chlorine dioxide [J]. Water Res, 1996, 30(10): 2371 ~ 2376.

[6] 邵志良. 应用二氧化氯消毒饮水的评价 [J]. 环境科学研究, 1992, 5(1): 47 ~ 50.

[7] 乔勇, 张玉先. 给水处理中二氧化氯与臭氧的应用比较 [J]. 化工标准计量质量, 2001(8): 21 ~ 25.

[8] Lechevallier M W, Cawthon C D, Lee R G. Inactivation of biofilm bacteria [J]. Appl & Environ Microbiol, 1988, 54(10): 2492 ~ 2497.

[9] 顾平, 张凤娥. 应用高锰酸钾降低水中三氯甲烷的研究 [J]. 环境科学学报, 1998, 18(1): 104 ~ 107.

[10] Lind C. Reducing total and dissolved organic carbon: comparing coagulants [J]. Environ Technol, 1996, 17(3): 54 ~ 59.

[11] Narkis N, Rebhun M. Stiometeic relationship between humic and fulvic acids and flocculants [J]. Water Technol, 1987, 69: 6 ~ 12.

[12] 周大佐. 饮用水中 THMs 的形成及国外常用控制方法简介 [J]. 净水技术, 1997(2): 33 ~ 35.

[13] Lechevallier M W, Becker W C, Schorr P, et al. Evaluating the performance of biologically active rapid filters [J]. JAWWA, 1992, 84(4): 136.

[14] 李永秋, 王占生. 生物预处理对饮用水致突变活性影响的研究 [J]. 中国给水排水, 1996, 11(2): 7 ~ 9.

[15] 蒋展鹏, 廖孟钧. 腐殖酸在活性炭上吸附平衡的研究 [J]. 水处理技术, 1988, 14(5): 306 ~ 313.

[16] 吴国权. 活性炭在给水处理中的应用 [J]. 净水技术, 1995, 13(4): 25 ~ 28.

[17] 吴红伟, 刘文君, 王占生. 臭氧组合工艺去除饮用水源水中有机物的效果 [J]. 环境科学, 2000, 21(4): 29 ~ 33.

[18] 李灵芝, 王占生. GAC-NF 组合工艺处理微污染饮用水的研究 [J]. 水处理技术, 2003, 29(1): 222 ~ 224.

[19] 范延臻, 孙治荣, 王宝贞. GAC, UF, RO 去除饮用水中氯仿、四氯化碳性能的试验研究 [J]. 中国给水排水, 1999(15): 9 ~ 12.

[20] 李灵芝. NF 和 RO 对致突变物和无机离子去除效果比较 [J]. 环境科学, 1997, 18(5): 65 ~ 67.

[21] 李灵芝. 纳滤(NF)在饮用水处理中的应用 [J]. 给水排水, 1997, 23(5): 16 ~ 18.

(收稿日期 2004-02-24 编辑:傅伟群)

(上接第 3 页)

[16] 丁杭军, 文湘华, 黄霞, 等. 一体式膜-生物反应器处理医院污水 [J]. 中国给水排水, 2001, 17(9): 1 ~ 5.

[17] 何义亮, 吴志超, 李春杰, 等. 厌氧膜生物反应器处理高浓度食品废水的应用 [J]. 环境科学, 1999, 20(6): 53 ~ 55.

[18] 管运涛, 蒋展鹏, 祝万鹏, 等. 两相厌氧膜-生物系统处理造纸废水 [J]. 环境科学, 2000, 21(4): 52 ~ 56.

[19] 李春杰. 焦化废水的一体化膜-序批式生物反应器处理研究 [J]. 上海环境科学, 2001, 20(1): 24 ~ 27.

(收稿日期 2004-10-11 编辑:傅伟群)