

文章编号: 1007-8924(2008)01-0091-06

废水处理中膜生物反应器的研究进展

白玲^{1,2}, 蓝伟光^{1,3}, 严滨³, 万金保¹(1. 南昌大学 环境科学和工程学院 教育部鄱阳湖生态及生物资源利用重点实验室, 南昌 330047;
2. 江西农业大学 理学院, 南昌 330045; 3. 新加坡新达科技集团, 新加坡 569095)

摘要: 膜生物反应器作为一种新型高效的生物处理技术和绿色技术, 在水处理领域中得到了广泛的应用. 综述了膜生物反应器在全世界的研究现状, 膜生物反应器的构型、好氧膜生物反应器和厌氧膜生物反应器及应用情况, 膜污染控制技术. 探讨和展望了膜生物反应器的应用前景, 指出了今后的研究方向.

关键词: 废水处理; 膜生物反应器的构型; 好氧和厌氧膜生物反应器; 膜污染控制

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A

膜生物反应器 (Membrane Bioreactor, 简称 MBR) 技术是一种新型高效的生物处理技术和绿色技术^[1], 具有许多其他生物处理技术无法比拟的明显优势, 其主要优点为: 系统处理效率高; 高负荷率; 占地面积小, 节省空间, 因而得到了人们越来越多的重视^[2], 已成为国外如水环境研究基金会 (WERF) 和国际水协会 (IWA) 的研究重点之一. MBR 自开始研究和应用的近 30 年来, 已经进化了几代 MBR 系统, 已逐步应用于市政污水、工业废水的处理及回用之中.

1 膜生物反应器工作原理

膜生物反应器是常规活性污泥法的进一步发展. 它主要由膜组件和生物反应器两部分组成. 大量的微生物 (活性污泥) 在膜生物反应器内与基质 (废水中的可降解有机物等) 充分接触, 通过氧化分解作用进行新陈代谢以维持自身生长、繁殖, 同时使有机污染物降解. 膜组件通过机械筛分、截留等作用对废水和污泥混合液进行固液分离. 生物处理系统和膜组件的有机结合, 不仅提高了系统的出水水质和运行的稳定性, 还延长了大分子物质在生物反应器中的水力停留时间, 使之得到最大限度的降解, 并加强了系统对难降解物质的去除效果.

通常提到的膜生物反应器, 实际是三类反应器的总称, 它们分别是: 1) 膜-充氧生物反应器 (MABR); 2) 萃取膜生物反应器 (EMBR); 3) 膜分离生物反应器 (BSMBR, 简称 MBR). 目前 MABR 和 EMBR 还处在实验室阶段, 尚无实际的工程应用. 应用最广泛的是膜分离生物反应器.

1.1 MBR 的构型

按膜组件和生物反应器的相对位置, MBR 主要有两种构型: 一体式 (浸没式) 和分置式 (旁流式) 膜生物反应器. 1989 年, 日本学者 Yamamoto 等首先开发了一体式 MBR, 主要应用于市政和工业废水的处理, 其最大特点是运行能耗低, 且具有结构紧凑、体积小等优点; 但单位膜的处理能力小, 膜污染较重, 透水率较低. 分置式 MBR 的膜组件形式一般为平板式和管式, 目前主要应用于工业废水的处理, 其特点为: 运行稳定可靠, 操作管理容易, 易于膜的清洗、更换及增设; 但动力消耗较高. 与分置式相比^[3], 浸没式可用于大规模的废水处理厂. 这也是浸没式膜组件得以广泛应用的原因. 目前世界上约有 55% 使用浸没式 MBR.

近年出现的新型气升循环分体浸没式 MBR^[4], 其特点是膜单元与生物反应器分置, 便于系统维修和膜清洗, 膜清洗时对生物反应器工作状态影响很

收稿日期: 2006-09-15; 修改稿收到日期: 2006-10-30

中国知网白 <https://www.cnki.net> 和县人, 博士生, 副教授, 从事废水处理和资源化. (bailing716@yahoo.com.cn)

小;生物反应器与膜单元之间的循环无需循环泵;膜组件采用浸没式,保留了浸没式膜生物器低能耗的特点.该工艺可处理浓度较低的化粪池上清液,出水经简单后处理就可达到建设部颁布的生活杂用水回用标准.如 Fan 等^[5]采用带有 H 型循环导管气升循环分体浸没式 MBR 处理盥洗废水并回用, COD, BOD₅, NH₄-N, 色度和浊度的平均去除率分别为 90%, 99%, 95%, 80% 和 99.7%, 出水水质低于中国盥洗废水回用的标准要求.用于处理盥洗废水回用的能耗约为 0.32~0.64 kWh/m³, 平均操作花费约为 0.11 美元/m³. 因此 MBR 构型的发展, 应朝着经济、高效的方向发展.

1.2 好氧和厌氧 MBR

按生物反应器的需氧性又可分为好氧 MBR 和厌氧 MBR. 好氧 MBR 工艺的实际商业应用最早出现在 20 世纪 70 年代末期的北美, 紧接着出现在 80 年代早期的日本. 差不多也在这个时候, 厌氧 MBR 工艺在南非和日本进入了工业污水处理市场. 而在欧洲好氧 MBR 工艺直到 80 年代中期才第一次出现. 好氧和厌氧系统比较见表 1.

表 1 好氧和厌氧系统比较

Table 1 Comparison of aerobic and anaerobic systems

| 项 目 | 厌 氧 | 好 氧 |
|------|---------------|---------------|
| 能 量 | 低 | 高 |
| 去除率 | 60%~90% | ≥95% |
| 污泥产量 | 低 | 高 |
| 稳定性 | 低~中 | 中~高 |
| 启动时间 | 2~4 个月 | 2~4 周 |
| 营养物 | 低 | 可以高 |
| 生物气 | 有 | 无 |
| 碱 度 | 高 | 低 |
| 臭 味 | 潜在 | 少 |
| 温 度 | 大多数为 30~35 °C | 大多数为室温 |
| 应用范围 | 高浓度有机废水和难降解废水 | 低或高浓度的市政和工业废水 |

从表 1 可知, 好氧 MBR 出水水质高, 出水适于回用, 操作简单和占地面积小等优点使其得到了广泛的商业化应用. 据报道世界上约有 98% 以上的工程是膜分离工艺与好氧生物反应器相结合. 一般来说, 好氧 MBR 负荷率一般在 1.2~4.2 kgCOD/(m³·d) 之间, 厌氧 MBR 负荷率在 2.9~50 kgCOD/(m³·d) 之间, 因此厌氧 MBR 特别适合处理高浓度有机废水, 而用好氧 MBR 是不可替代的. 厌氧 MBR 可作为特种废水或难降解废水的非

常好的前处理过程, 再根据水质的类型, 结合好氧 MBR、纳滤和反渗透进行处理, 使出水达标排放. 近年来, 人们对此领域进行了很多研究. 如, 利用厌氧工艺与好氧 MBR 结合处理工业废水也获得了良好的去除效果. Ren 等^[6]采用两相厌氧 MBR 处理高浓度传统中医药废水, 运行了 452 天, COD 的去除率为 90%~99.8%. Shin 等^[7]利用浸没式 MBR 和厌氧升流床过滤(AUBF)反应器处理猪场废水, 提高了 COD 和氮的去除率, COD 和总氮的去除率分别为 91% 和 60%. 刘超翔等^[8]进行毛染废水中试研究的结果表明, 好氧 MBR 与厌氧酸化预处理的联合使用可进一步提高系统对 COD 和色度的去除效果, 系统出水 COD 小于 20 mg/L, 无 SS, 色度小于 4 度, 水质明显优于接触氧化处理工艺. 崔学刚等^[9]通过厌氧工艺与 MBR 相结合处理化工废水, 结果表明系统出水水质稳定, 抗冲击负荷能力强, COD 和 SS 的去除率分别大于 95% 和 99.5%. Kocadagistan 等^[10]采用升流式厌氧固定床和外置式悬浮好氧 MBR 结合处理高浓度合成废水, COD 的去除率为 94%~98.7%, PO₄³⁻-P 去除率高达 96%~97%. Ahn 等^[11]采用序批式缺氧/厌氧 MBR 处理家庭废水, 提高了氮和磷的去除率, 分别为 93%, 60%. Zhang 等^[12]研究在一个反应器内, 采用阶段性厌氧和浸没式好氧 MBR 结合处理高 NH₄⁺-N, COD 合成废水, 利用厌氧区产生的大量甲烷, 在通过好氧区时作为反硝化的碳源, 在好氧区发生同时硝化反硝化反应, 大大提高了污染物的去除效果, 而且降低了能耗, 其 COD 的去除率大于 99%, NH₄⁺-N 去除率为 84%~94%, 达到了经济高效的目的.

2 膜生物反应器在废水处理中的研究及应用

2.1 MBR 在世界范围内的研究

自 1966 年美国的 Dorroliver 公司首先在美国化学会议上发表了 MBR 污水处理工艺的研究结果, 即 MBR 产生及应用以来, 人们进行了大量理论和应用研究. MBR 早期的研究主要在日本、英国、韩国和法国. 目前 MBR 研究和应用较多的是日本、北美(加拿大、美国等)、欧洲(英国、荷兰、法国、德国等)、韩国、中国和南非.

目前 MBR 的研究领域主要在膜污染、设计和操作参数、污泥性质、微生物特性、花费、建模等方

面,而在膜寿命、前处理和工厂规模的扩大方面研究较少。大多数研究集中在实验室、中等规模的短期操作,很少有工业规模的长期操作研究。在饮用水和地下水处理中应用很少。

我国对 MBR 的研究起步较晚,但发展迅速。自 1993 年中国科学院生态环境研究中心开始膜生物反应器^[13]的研究工作以来,也进行了大量理论和应用研究。研究内容集中于膜工艺的开发和膜污染的防治等。目前,国内较活跃的 MBR 废水处理研究机构有中科院、清华大学、同济大学、哈尔滨工业大学、华东理工大学等单位。

膜污染是限制膜生物反应器更快地商业化的主要因素之一。膜污染导致膜通量下降,减少了生产力,缩短了膜的寿命,增加了膜生物反应器的运行费用。因此必须减轻和控制膜污染,在低能耗的条件下获得较大的膜通量。早期的研究主要集中在膜污染的原因、特性和模型等方面,近年来主要的研究在更有效和更经济的防止或减轻膜污染的方法。2006 年 Zhang 等^[14]首次提出并绘制了浸没式 MBR 的污染三阶段机理图,对于进行膜污染控制具有重要的指导意义。

目前膜污染控制技术主要分为以下几类:

1) 在次临界通量下运行,通过控制过滤过程、曝气在膜表面的冲刷、间歇式操作,来减少泥饼层在膜表面的形成。Cho 等^[15]研究了厌氧生物反应器错流微滤系统在次临界通量的操作条件下的污染特性。黄圣散等^[16]研究了平板膜生物反应器在次临界通量运行下的膜污染状况,并结合膜污染模型进一步表征膜表面的污染特性。试验结果表明,该平板膜生物反应器在次临界通量运行的情况下,膜污染可分为膜污染缓慢发展阶段和膜污染迅速发展阶段,可分别用膜孔堵塞模型和泥饼阻力模型表征膜阻力与时间的变化关系,同时,对运行后的膜阻力分布进行分析,表明泥饼阻力和孔道吸附堵塞阻力是膜污染的主要组成部分,分别占到总阻力的 73% 和 24%,而膜本身阻力仅占 3%。Gander 等^[17]研究用好氧浸没式 MBR 处理家庭废水,膜组件在临界通量以下运行可大大延缓膜污染;同时研究了利用汹涌的曝气来冲刷膜表面减少浓差极化来减少膜内在的污染层,完成一个虚拟的错流效果。Jeison 等^[18]研究在厌氧 MBR 废水处理中,通过评价 TMP 的稳定状态,进行在线泥饼层管理的先进方法。Ueda

等^[19]研究用浸没式中空纤维 MBR 处理家庭废水时,曝气强度对泥饼去除的影响。研究表明空气流速的增加可以增加对泥饼去除效果,但有一个临界值存在,在此临界值之上,空气流速的增加对泥饼去除效果没有影响;不增加空气流速而通过加强空气的流动可以改进泥饼去除效果。Low 等^[20]研究利用机械运动的方法(包括横向振动、纵向振动和振动剪切波强化过滤装置(VSEP))来维持 MBR 膜在相对“清洁”的条件下和保持膜通量与清洁的膜相近。研究表明,控制平均 0.2 m/s 的振动频率,对浸没式 MBR 能维持其清洁膜通量的 75% 以上,且具有高膜驱动压力的 VSEP 比浸没式 MBR 具有 6.8 倍的通量,维持稳定通量达到清洁膜通量的 70%。Ren 等^[6]研究中试规模的 MBR 处理高浓度医药废水,用 BPANN 优化操作参数,能有效减轻膜污染。但是,即使在次临界通量下运行时也有膜污染发生, TMP 也会升高,膜通量随时间下降^[21]。因此,要考虑用其它预防性的方法来维持系统的稳定操作。当采用间歇式操作时,研究表明小规模 MBR 处理高污染的废水比大规模 MBR 更为经济可行。

2) 通过投加粉末状活性炭(PAC)改善混合液的过滤特性。向生物反应器内投加 PAC 有助于改善污泥混合液的特性,减小过滤的阻力,提高膜的渗透速率,并能提高膜生物反应器的处理效率;此外 PAC 对膜表面的泥饼层具有冲刷作用,可以大为减轻膜污染。Ye 等^[22]研究用 MBR 处理市政废水中,投加 PAC 后形成的动力学膜有一个合适的厚度,能大大减轻膜污染并能提高污染物的处理效率。结果表明, COD 的去除率由 94.16% 提高到 97.09%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率由 72.55% 提高到 76.13%;在运行时不需任何化学清洗。

3) 通过反冲洗、反脉冲和化学清洗去除污染层。反冲洗对膜性能要求较高(目前能进行反冲洗的商业化的膜较少),为避免损伤膜而导致出水恶化,反冲洗应在低压状态下操作。采用反冲洗和反脉冲^[23]能显著提高膜通量,但反冲洗要消耗一定量净化水,反冲洗周期过短会使出水量下降,过长则膜通量衰减加快,故在膜生物反应器中应寻找最佳反冲洗周期。Kang 等^[24]对厌氧 MBR 中的有机膜和无机膜的过滤特性进行了比较,研究表明反冲洗和回流方式能有效地减轻膜污染。有机膜用酸性(pH 2.0)反冲洗,膜通量增加两倍;无机膜用碱性反冲洗,提

高了膜通量;且回流方式能获得更高的膜通量.清洗方法可以是在线和离线清洗.葛元新等^[25]介绍了膜清洗的几种方法及发展状况,并提出了膜清洗技术的发展方向.张传义等^[26]研究表明,膜污染存在一个“临界膜污染”水平,当膜污染发展到“临界膜污染”水平,膜污染急增,此时在线清洗对膜污染的去除效果不明显,建议在线清洗最好控制在临界膜污染之前进行.

由于生物污染而增加了膜污染的复杂性.随着现代分析仪器的发 展,如 PCR 技术,原子力显微镜和扫描电镜等研究微生物群落结构动力学变化与降解功能的关系,生物污染已被广泛地研究和表征^[27],但这些仪器价格昂贵,很难普及.因此在这个领域的进展相对要慢.生物污染控制仍是 MBR 的一大挑战.

4) 选择合适的膜材料和优化膜组件.通常认为亲水性膜及膜材料电荷与溶质电荷相同的膜较耐污染.人们常用膜表面改性的办法引入亲水基团,或用复合膜复合一层亲水性分离层,或采用阴极喷镀法在膜表面镀一层碳.由亲水材料 PVA(聚乙烯醇)制作耐污染膜是解决膜污染问题的一个有效途径,具有极大的发展潜力.2005 年 Bae 等^[28]的最新研究发现,通过 TiO₂ 的极小微粒固定在膜表面可使膜污染明显减轻,而且比由于增加亲水性而减轻污染的程度要大得多.Zhang 等^[29]用一种新颖的不锈钢膜组件金属 MBR,用曝气浸没式 MBR 处理家庭污水,实验表明,膜污染可通过在线反冲洗和间歇运行模式被有效地减轻.Fane^[3]总结了膜组件的特征,建议使用平板单元系统和浸没式膜组件,因为它们具有填充密度高、能耗低、处理能力强和易操作等特点.Katayon 等^[30]研究表明,用 MBR 处理食品工业废水时,水平放置的膜组件比垂直放置的膜组件具有更高的膜通量,更高的浊度和 SS 去除率,且抗污染能力较强.2006 年 Rector 等^[31]研究了旋转式中空纤维 MBR 的膜组件装填密度和旋转频率对其分散特性的影响,结果表明旋转式中空纤维 MBR 膜组件设计全面提高了混合液的传质特性.

2.2 MBR 在世界范围内的应用

目前世界上 MBR 供应商主要有:Kubota(日本,板框式膜组件),Zenon(加拿大,中空纤维膜组件),Norit(荷兰,中空纤维膜组件),Usfilter(美国,管式膜组件),Microdyn-Nadir(德国,夹层式平板膜组件),Mitsubishi-Rayon(日本,中空纤维膜组

件).实际应用最为广泛的板框式和中空纤维膜组件,为浸没式 MBR 构型;管式膜组件主要应用于外置式 MBR 构型.最近,德国 Microdyn-Nadir 公司开发了最先进的称为 BIO-CEL[®] 的浸没式膜组件,它标志着膜生物反应器技术的一大突破.BIO-CEL[®] 通过一个创新的膜组件设计即为夹层式平板膜结构,它集成了中空纤维膜和平板膜 MBR 的优点,使之具有出水水质优良、抗阻塞及污染的能力强、膜面积和通量大、成本低等特点,已应用到 MBR 实际工程中,取得好的处理效果,因此具有广泛应用的前景.BIO-CEL[®] 膜与 Zenon 的中空纤维膜、Kubota 的平板膜的性能比较见表 2.

表 2 Microdyn-Nadir 的 BIO-CEL[®] 膜与 Zenon, Kubota 膜的性能比较

Table 2 The comparison of Microdyn-Nadir and Zenon, Kubota's membrane performance

| | Zenon (加拿大) | Kubota (日本) | Microdyn-Nadir (德国) |
|--------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 膜构型及特点 | 中空纤维膜 膜丝柔性 可反冲洗 | 支撑式平板膜 膜片为刚性 不可反冲洗 | 夹层式平板膜 膜片为柔性 可反冲洗 |
| 填充密度 | 160 m ² /m ³ | 80 m ² /m ³ | 160 m ² /m ³ |
| 典型膜通量 | 30 L/(m ² ·h) | 25 L/(m ² ·h) | 30 L/(m ² ·h) |
| 膜污染特性 | 缠绕性纤维物质,污泥堵塞,卡在纤维间,无法通过反冲去除 | 沟槽式,低填充密度,堆积在板间,始于板固定处,没有反冲洗 | 平板膜不会夹带污泥或纤维物质,反冲洗及 SBC 清洗可避免过量微生物沉积 |
| 清洗特性 | 独立的清洗 昂贵的化学及机械清洗 | 独立的清洗 昂贵的化学及机械清洗 | SBC 操作中机械清洗 长期可靠的运行,长间隔的简单清洗 |

目前,在世界范围内,实际运行和正在建设的 MBR 系统已超过了 2 200 套^[32],主要用于市政废水、家庭废水和工业废水、垃圾渗滤液处理,在饮用水和地下水处理中也有少量的应用.MBR 大部分用于处理市政废水和家庭废水,约占 66%.近年来,用于处理工业废水的 MBR 数目有所增加,约占 33%.

在污水排放标准越来越严格和水资源短缺问题日益突出的背景下,随着膜材料和污染控制技术的不断发展,MBR 工艺污水处理规模已从小规模逐渐发展到大规模.据统计,在世界范围内,规模在处理量为 10 000 m³/d 以上污水处理厂约占 7%.目前世界上最大操作规模的工厂在欧洲的 Brescia(42 000

m^3/d) 和 Kaarst ($45\,000\ \text{m}^3/\text{d}$), 北美的 Traverse ($26\,900\ \text{m}^3/\text{d}$). 在建的有 Johns Greek ($40\,000\ \text{m}^3/\text{d}$) 和北京 ($60\,000\ \text{m}^3/\text{d}$) 等.

MBR 在污水处理厂的升级改造中也具有明显的优势. 加拿大 Zenon 公司的 MBR 工艺污水处理规模也从 1993 年的小于 $1\,000\ \text{m}^3/\text{d}$ 发展到现在的 $45\,000\ \text{m}^3/\text{d}$. 例如, 上述世界上最大操作规模的工厂, 意大利 Brescia 市的 Verziano 污水处理厂就是于 1999 年改建于 1980 年的原污水处理厂, 原系统处理量为 $12\,000\ \text{m}^3/\text{d}$, 采用 Zenon 浸没式中空纤维膜组件把系统改造成处理能力为 $42\,000\ \text{m}^3/\text{d}$ 的 MBR, 并于 2002 年 10 月投入使用 (MLSS 浓度高达 $8\sim 10\ \text{g/L}$), 不仅减少了 50% 的占地, 并且出水水质明显优于原工艺. 可见, 就处理生活污水或城市污水而言, MBR 技术已趋成熟.

国内在实际工程应用上发展很快. 天津清华德人环境工程有限公司, 率先在国内实施了膜生物反应器在水处理行业的产业化, 取得了很好的效果. 该产品已经应用于生活污水回用、工业印染废水处理回用、垃圾填埋场渗滤液处理等领域, 已建立 20 多项示范工程. 上海荏原成套工程有限公司的 PW-P 膜分离活性污泥处理装置为专门处理高浓度有机废水的系列产品, 已经应用于全国各地, 涉及化工、制药、食品、畜产和生活废水等各行业. 近年来, 在污水处理规模上也得到了迅速发展. 如: 2004 年建成了洛阳石化 PTA 污水回用工程 ($4\,800\ \text{m}^3/\text{d}$) 和巴陵石化己内酰胺污水处理厂 ($7\,200\ \text{m}^3/\text{d}$), 2005 年建成中石化海南炼化公司炼油污水深度处理工程 ($10\,000\ \text{m}^3/\text{d}$), 2006 年建成广东大亚湾石化工业园综合污水处理厂 ($25\,000\ \text{m}^3/\text{d}$); 在建的有北京密云再生水厂污水处理 ($45\,000\ \text{m}^3/\text{d}$), 其中一期工程 ($30\,000\ \text{m}^3/\text{d}$) 已于 2006 年 6 月建成, 还有北京北小河污水处理厂 ($60\,000\ \text{m}^3/\text{d}$) 在建等等.

3 面临的问题和挑战

3.1 工艺问题

生物反应器的泡沫; 膜污染; 低氧传质效率; 粗废水固体的影响; 操作过失.

3.2 发展 MBR 工艺的挑战

膜污染, 特别是生物污染的控制; 前处理过程的有效性; 工厂生产能力的扩大; 膜具有长寿命和低价; 费用最低化.

4 展望和发展方向

1) MBR 技术已在废水处理中起到了重要作用. 近几年的经验表明, 这项技术是成熟的, 进行成功的设计和运行是可能的, 能用于市政废水和工业废水处理. 因此, 随着 MBR 技术的发展和日益成熟, MBR 技术将在世界范围内作为一种经济、高效的实用技术而被广泛应用.

2) 在膜污染的控制方面, 进一步深入研究膜污染的机理, 尤其应加强对生物污染的研究, 发展更有效、更容易控制和最小化膜污染的方法. 充分利用计算机和传感器技术, 实行在线控制膜污染. 清洗方法的改进方面特别注意应使用安全化学品, 使该技术更加环保.

3) 应根据不同的污水类型, 正确选用膜的构型和膜材料, 不断开发新型节能、高效的膜材料和膜组件. 促进好氧和厌氧 MBR 的有机结合. 充分利用数学模型和计算机技术, 优化运行的操作参数, 以达到最佳的出水水质, 使之更加经济高效.

4) MBR 应用有前途的领域应是市政废水处理 (由于城市需占地面积少, 高质量的出水可回用或作为纳滤和反渗透的前处理, 严格的水排放标准的需要); 工业废水中的食品加工废水、屠宰场废水和垃圾渗滤液处理, 特别是对垃圾渗滤液中内分泌裂解物质 (EDS) 有很好的去除效果; 饮水中硝酸盐的去除 (去除率可达 98.5%).

5) MBR 的未来的发展主要应放在规模扩大方面. 大力提高大规模工厂的数目, 以适应现代水处理发展的要求.

6) 加强前处理领域的研究. 研究解决膜堵塞和操作失败的有效方法.

7) MBR 能量需求的优化, 最大程度地降低运行成本. 建议最大限度地利用空气或自产能的利用和再循环; 减少维护和更换膜的费用; 减少能耗和人力需求.

参 考 文 献

- [1] Howell J A. Future of membranes and membrane reactors in green technologies and for water reuse[J]. Desalination, 2004, 162, 1-11.
- [2] 魏源送, 郑祥, 刘俊新. 国外膜生物反应器在污水处理中的研究进展[J]. 工业水处理, 2003, 23(1): 1-5.
- [3] Fane A G. Membrane bioreactors: design & operational

- options[J]. *Filt'n & Sep'n*, 2002, 39(5): 26—29.
- [4] 吴俊奇, 于莉, 曹健. 膜生物反应器的研究现状[J]. 北京建筑工程学院学报, 2004, 20(3): 11—15.
- [5] Fan Yaobo, Li Gang, Wu Linlin, *et al.* Treatment and reuse of toilet wastewater by an airlift external circulation membrane bioreactor[J]. *Proc Biochem*, 2006, 41: 1364—1370.
- [6] Ren Nanqi, Chen Zhaobo, Wang Xiangjing, *et al.* Optimized operational parameters of a pilot scale membrane bioreactor for high strength organic wastewater treatment [J]. *Inter Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, 56(4): 216—223.
- [7] Shin Jeong-Hoon, Lee Sang-Min, Jung Jin-Young, *et al.* Enhanced COD and nitrogen removals for the treatment of swine wastewater by combining submerged membrane bioreactor (MBR) and anaerobic upflow bed filter (AUBF) reactor [J]. *Proc Biochem*, 2005, 40(12): 3769—3776.
- [8] 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—60.
- [9] 崔学明, 程焕龙, 张连新, 等. 膜生物反应器处理化工废水[J]. 中国给水排水, 2002, 18(10): 73—74.
- [10] Kocadagistan B, Kocadagistan E, Topcu N, *et al.* Wastewater treatment with combined upflow anaerobic fixed-bed and suspended aerobic reactor equipped with a membrane unit [J]. *Proc Biochem*, 2005, 40: 177—182.
- [11] Ahn Kyu-Hong, Song Kyung-Guen, Cho Eulsaeng, *et al.* Enhanced biological phosphorus and nitrogen removal using a sequencing anoxic/anaerobic membrane bioreactor (SAM) process[J]. *Desalination*, 2003, 157: 345—352.
- [12] Zhang Daijun, Lu Peili, Long Tengrui, *et al.* The integration of methanogenesis with simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor [J]. *Proc Biochem*, 2005, 40: 541—547.
- [13] 孟凡生, 王业耀. 膜生物反应器在我国的研究发展展望[J]. 水资源保护, 2005, 21(4): 1—4.
- [14] Zhang Jinsong, Chua Hwee Chuan, Zhou Jiti, *et al.* Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors [J]. *J Membr Sci*, 2006, 1016(10): 1—49.
- [15] Cho B D, Fane A G. Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor [J]. *J Membr Sci*, 2002, 209(2): 391—403.
- [16] 黄圣散, 吴志超. 膜生物反应器次临界通量运行的膜污染特性研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(7): 512—515.
- [17] Gander M, Jefferson B, Judd S. Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations [J]. *Septn and Purifn Tech*, 2000, 18: 119—130.
- [18] Jeison D, van Lier J B. On-line cake-layer management by trans-membrane pressure steady state assessment in anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment [J]. *Biochem Eng J*, Corrected Proof, Available online 6 January 2006: 1—6.

文献[19—32]省略, 有兴趣的读者请与作者联系。

——本刊编辑部

Progress of membrane bioreactor in wastewater treatment

BAI Ling^{1,2}, LAN Weiguang^{1,3}, YAN Bin³, WAN Jinbao¹

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Ecology and Bio-resource Utilization, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2. College of Natural Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

3. Sinomem Technology Limited, Singapore 569095)

Abstract: Membrane bioreactor is a kind of new biological, green technique used in wastewater treatment and reclamation which combines the highly efficient separation technique with biological degradation. It widely applied in wastewater treatment in recent years. New development of membrane bioreactor in wastewater treatment was reviewed, including its application, configurations, membrane bioreactors of aerobic and anaerobic, membrane fouling and the measures for its control. The application prospect and the research direction in future are probed into.

Key words: wastewater treatment; membrane bioreactor configurations; membrane bioreactors of aerobic and anaerobic; control membrane fouling