

膜生物反应器中的生物学特征

金若菲 周集体 王 竞 金玉洁

(大连理工大学环境与生命学院 大连 116023)

摘要: 由于在膜生物反应器内膜的截留作用,使膜生物反应器内的一些生物学特征与传统的活性污泥过程有所不同。本文系统地阐述了膜生物反应器内的微生物群落、活性污泥及微生物产物的生理生化特征。

关键词: 膜生物反应器, 微生物群落, 活性污泥, 微生物产物

中图分类号: Q93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-2654 (2004) 02-0121-05

BIOLOGICAL ASPECTS IN THE MEMBRANE BIOREACTOR

JIN Ruo-Fei ZHOU Ji-Ti WANG Jing JIN Yu-Jie

(School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Abstract: For the efficient interception performance of the membrane, some biological aspect in membrane bioreactor are different from those in the activated sludge process. The physiological and biochemical characteristics of microbial community, activated sludge, and microbial products in the membrane bioreactor are illustrated in this paper.

Key words: Membrane bioreactor, Microbial community, Activated sludge, Microbial products

膜生物反应器 (membrane bioreactor, 简称 MBR) 是活性污泥生物反应器与膜分离技术组合的一种新型反应器, 它用膜分离过程代替了污泥的沉淀过程。因此, 由于膜的分离作用使 MBR 具有如下优点: 生物浓度高, 反应器体积小; 剩余污泥量少, 生物负荷率低; 发生解耦联作用, 使 SRT 与 HRT 相分离; 出水水质稳定和优良; 生物反应器运行不受污泥膨胀的影响。自上世纪 70 年代, 美国人 Smith 创造性地把膜生物反应器应用到废水处理中, MBR 广泛应用于市政污水和工业废水及循环水处理^[1]。

膜的高效截留作用使生物反应器成为一个对微生物来说相对封闭的系统, 因此 MBR 的生物学特性与传统的活性污泥过程有所不同。下面将就 MBR 中的微生物群落、活性污泥及微生物产物的生理生化特征进行分析。

1 微生物群落

活性污泥系统 (CAS) 是人造的生态系统, 在这个系统中微生物是分解者, 而原生和后生动物是捕食者。微生物群落的动力学性质和组成依赖于反应器的运行状态, 例如: SRT, 生物浓度等等。而在 MBR 中, 由于膜的无选择性分离作用为各种微生物, 如生长较慢的菌种 (如硝化细菌)、不易沉降的菌种 (如丝状菌) 等在生物反应器中的停留和大量生长创造了条件, 从而丰富了生物反应器中的微生物相, 提高了污泥对难降解物质的降解速率, 缩短了驯化周期。因此, 在 MBR 和 CAS 工艺中, 微生物群落是不同的^[2]。

1.1 异养微生物的存在形态 与 CAS 相比 MBR 中微生物的总数多, 但异养微生物占总微生物的比例较低, 这是由于在 MBR 中 SRT 较长, 而 F/M 相对较低, 使死亡微生物大量积累, 微生物的生活力降低^[3]。在 MBR 长时间的运行过程中, 即使原水的水质水量保持恒定, 各种运行参数保持稳定, 活性污泥的总体结构也会发生动态的变化, 微生物的组成形态和处于悬浮生长和自由生长的细胞的比例在很宽的范围内变化。在文献[4]的研究中表明, 在大部分时间内, 大部分生物保持着单个细菌的自由悬浮状态, 只有少部分是 10 ~ 30 μm 直径的菌胶团, 而这些菌胶团是由粒状或短杆菌组成, 但在 CAS 中类似的结构却很少见到。在 MBR 的长时间运行过程中丝状菌由开始时的 3 ~ 4 种逐渐变成一种细长的丝状菌占优势, 同时这些丝状菌产生大量的胞外聚合物 (EPS) 而形成典型的聚合体。另外, 在大多数情况下, 螺旋菌的存在量很少, 但在个别情况下, 也可以大量的观察到。借助于荧光原位杂交技术 (FISH) 对细菌进行检测, 发现在膜生物反应器内占优势的是 β 亚类的 *Proteobacteria*。

1.2 微型动物的存在 在污水的生物处理过程中, 原生动物等捕食者的存在具有重要的作用, 他们可以维持微生态系统的稳定, 同时可以捕食那些分散于水中的游离微生物、降低水的浊度而提高出水的水质。在传统的活性污泥法中, 微型动物是多样的, 常包括多种原生动物和后生动物, 有时还可以发现肉足类的动物, 而且没有哪种微型动物在数量上占明显的优势, 同时微生物群落的合理分布是污泥健康和反应器性能良好的标志。而在 MBR 中, 较长的污泥龄应该有利于高等微型动物的产生和存在, 而实际上在 MBR 中的微型动物的存在却是很不稳定而且数量相对较少。文献[3]指出, 在 1 年多的运行中, 只是在一次观察中发现了 3 种原生动物和 2 种后生动物, 在另一次观察中发现了 1 种后生动物, 在其它观察中都没有发现捕食动物。但是在 MBR 中微型动物的缺乏并没有对处理效果产生影响, 因为膜可以截留出水中的游离细菌。而在文献[5]中指出, 在较强剪切力的作用下, 在 MBR 中只有菌胶团, 而不存在轮虫和钟形虫, 而在剪切力的作用较弱时, 可以观察到菌胶团, 轮虫和钟形虫的同时存在, 并且轮虫和钟形虫还具有捕食活性, 因此微生物的多样性在不同的水力条件下是可以改变的, 换句话说, 在 MBR 中, 微生物群落的分布不能成为污泥健康和反应器性能良好的标志。

1.3 硝化细菌的存在 在 MBR 中, 膜的完全截留作用, 助于生长缓慢的硝化细菌得以生长并大量繁殖, 使 MBR 具有很强的硝化作用^[3]。同时在 MBR 中存在的硝化细菌主要是自氧氨氧化菌和异养硝化细菌, 而不是在具有硝化活性的 CAS 中普遍存在的化能自养氨氧化菌^[4]。在 MBR 中出现高的硝化作用的原因: (1) 由于硝化细菌具有很长的生长周期, 在传统的生物处理方法中, 由于 SRT 很短, 硝化细菌来不及生长就被淘汰, 而在 MBR 中, 由于膜的分离作用, 使硝化细菌不受污泥浓度的影响而被截留, 因此在 MBR 中硝化细菌的浓度比传统的生物处理方法中高。(2) 由于在 MBR 中污泥产量低, 因此其他以氨态氮为营养物的异养微生物数量少, 使得硝化细菌的竞争对手少^[5]。MBR 在处理市政污水时, 硝化细菌的最大比生长速率为 0.1 ~ 0.2d⁻¹。

2 污泥特性

2.1 污泥的浓度 在生物反应器中, 污泥浓度表示的是生物的数量, 较高的污泥浓度可以使反应器的污泥负荷降低, 而容积负荷提高。CAS 中污泥浓度通常为 1.5 ~ 3g/L, 而 MBR 中的污泥浓度通常为 10 ~ 50g/L^[6]。同时在处理生活污水和类似于生活污水等易

降解废水的 MBR 中, 其污泥浓度高于处理有毒或难降解工业废水的 MBR 的污泥浓度, 这是由于工业废水的水质影响的结果。同时污泥的粘性与浓度呈正比^[5]。

2.2 污泥的产率 目前使用的各种活性污泥法都不可避免地要排剩余污泥, 而污泥的处理费用占整个运行费 1/4。而 MBR 中由于污泥龄可无限长, 使污泥达到自身氧化, 因而剩余污泥产量少, 甚至可以实现无剩余污泥排放^[7]。同时, 在无剩余污泥排放的情况下, 反应器内污泥活性较高, 不排剩余污泥对系统影响不大。在 MBR 中原生动物与后生动物的掠夺没有出现, 污泥不排放, 于是怎样去维持稳定的生物浓度, 也就是零生物生长和污泥产量的问题成为了关键。在系统没有捕食者的情况下, 生物的零生长被下列因素限制: (1) 环境提供的能量的数量, (2) 维持能量的需要, (3) 细胞的衰老过程。根据生长-死亡的概念, 每单位生物量可利用的底物只允许一部分细胞生长, 而另外一些细胞由于生存能力的丧失而衰老。在这个概念里, 生长速度慢的细胞相应呈现低死亡率, 同时细胞的生长包括了来源于细胞自溶而产生的二次底物的生长。而在维持能量概念中认为微生物首先利用能量去满足它们维持能量的需要。维持函数包括细胞物质的世代周期, 蛋白质和 RNA 的连续替换, 渗透压去维持浓度梯度和细胞的运动性。如果能量供应过剩, 生物可能去成长。当达到最大生物浓度时, 限制营养物的供给满足生物的维持能量的需要, 则生物的生长和死亡都接近为零。文献^[8]根据活性污泥法基本动力学理论和试验数据, 从理论上解释了 MBR 污泥产量低的优点:

MBR 中的污泥浓度:

$$X = \frac{Y \times SRT}{1 + K_d \times SRT} \left[\frac{C_i - C_e}{HRT} + \frac{C_i - C_{sup}}{SRT} \right] \quad (1)$$

式中, MBR 中的污泥浓度 X 不仅与进出水水质、HRT、SRT 等条件有关, 而且与反应器污泥混合液上清液 COD 浓度有关。

而在 CAS 中, 剩余污泥从二沉池排掉, 由污泥和底物物料平衡可以得到其污泥浓度为:

$$\frac{X}{X^*} = \frac{Y \times SRT}{1 + K_d \times SRT} \left[\frac{C_i - C_e}{HRT} + \frac{C_i - C_e}{SRT} \right] \quad (2)$$

很明显, X 要比 X^* 低, 为了进一步确定量之间的差值, 可得:

$$\Delta X = |X - X^*| = \frac{Y \times SRT}{1 + K_d \times SRT} [C_{sup} - C_e] \quad (3)$$

式中 $[C_{sup} - C_e]$ 代表了 MBR 中膜组件对 COD 去除的贡献, 由于这部分 COD 不是通过微生物代谢过程实现, 不会产生相应的污泥浓度的增长, 因此 MBR 中膜组件不仅能够代替传统工艺中的二沉淀池, 而且对 COD 去除有一定的贡献作用。从 (3) 式中可以看出, 当进出水水质、运行参数和 COD 去除率相同时, (3) 中的污泥浓度差值 ΔX 表明 MBR 的污泥产量比传统活性污泥法要低, 从理论上解释了 MBR 污泥产量低的优点。

当污泥停留时间足够长时, 可以简化为 $\lim_{SRT \rightarrow \infty} \Delta X = 0$, 这时 (1) 和 (2) 相等, 即:

$$\lim_{SRT \rightarrow \infty} X = \lim_{SRT \rightarrow \infty} X^* = \frac{Y}{K_d} \left[\frac{C_i - C_e}{HRT} \right]$$

由此可以看出, MBR 系统在保持其他条件不变的条件下, 随着 SRT 的延长, 污泥浓度会逐渐增加直到达到最大值, 这个最大污泥浓度与进出水 COD 差值成正比, 与 HRT 成反比。

以上各式中： X -污泥浓度 mg/L， C_i -进水 COD 浓度 mg/L， C_e -出水 COD 浓度 mg/L， C_{sup} -反应器上清液 COD 浓度 mg/L。

2.3 污泥的活性

2.3.1 污泥对有机物的去除活性：MBR 与 CAS 相比，污泥去除有机污染物的比活性 ($gCOD/gMLVSS \cdot h$) 低，且不稳定，这是因为 MBR 中长的 SRT 和低的 F/M。但在 MBR 中，容积负荷高于 CAS，说明在 MBR 中，尽管活性差且不稳定，但处理潜力大，因为 MBR 中可以维持较高的生物浓度，并且生长缓慢的微生物也可以存在^[8]。

2.3.2 比耗氧吸收率 (OUR)：比氧吸收率是指溶解氧被好氧微生物的利用率，等价于活性污泥群落的新陈代谢活性，它表示了膜过滤污泥的生理状态和微生物的代谢活性。OUR 在 CAS 中大于 MBR 中^[3,4]，而在添加底物时，OUR 在 MBR 中明显增加，而在 CAS 中变化不大，说明在膜反应器中，微生物的生长不是被氧所限制，而是被底物所限制。同时在 MBR 中污泥的氧传递与 CAS 过程没有明显的不同，换句话说，膜分离没有明显提高在 MBR 反应器中的氧传递效率，也就是说在 MBR 中由于供氧而产生的运行费用没有比 CAS 明显降低^[5]。另外在 MBR 中，随着 SRT 的增加，OUR 降低，这是因为在内源呼吸过程中产生的惰性物质在反应器内的积累，在长的 SRT 时，由于高的污泥浓度阻碍了氧及底物对活性污泥絮体的由外到内的传递^[9]。

2.3.3 ATP 含量：ATP 是指在活细胞中高能化合物的含量。ATP 在 CAS 中大于 MBR 中，同时 OUR/ATP 的比在 CAS 中也大于 MBR，表示在所有的微生物群落中好氧微生物所占的比例较低，这是因为 MBR 中高 MLSS 的情况下，微生物没有完全处于好氧状态^[3]。

2.3.4 脱氢酶活性：脱氢酶是由活的生物体产生的，能酶促有机物脱氢反应，因此可以反映生物中的活性部分。在 MBR 中脱氢酶活性在开始阶段活性很高，随着一些微生物的老化，比活性降低，这可以解释为污泥中活性部分与非活性部分的比例降低所致^[9]。

2.3.5 多糖含量：多糖是微生物代谢产物的主要成分。在 MBR 中比多糖含量 ($g \text{ glucose/kgMLVSS}$) 低于 CAS，因为在 MBR 中污泥龄较长，生物的活性及生活力都较差。而总多糖含量 ($g \text{ glucose/L}$) MBR 中高于 CAS，是因为 MBR 中高的 MLVSS 含量^[3,10]。

3 微生物产物

微生物产物主要指胞外聚合物 (Extracellular polymeric substances, 简称 EPS) 和溶解性微生物产物 (Soluble microbial products, 简称 SMP)。溶解性微生物产物指微生物在代谢过程中排出或分泌的物质：包括 UAP (substrate utilization associated production)：微生物在分解基质产生能量，进行自身生长繁殖的同时产生；BAP (biomass associated production)：微生物细胞内源呼吸过程中，伴随细胞解体释放的。它的重要性在于它们普遍存在，并且是生物处理过程中出水 COD 和 BOD 的重要组成部分，同时尽管进水不同，但 SMP 组成上却类似^[11~13]。由于膜的高效截留作用使生物反应器成为一个对微生物来说相对封闭的系统。伴随着污水处理过程而产生的部分溶解性微生物产物有可能被膜截留，在生物反应器内积累，从而对系统的运行特性和微生物代谢特性产生影响。有关 MBR 中的 SMP 的特性研究始于 20 世纪 90 年代。SMP 在 MBR 中的特性主要包括：(1) SMP 在 MBR 中的积累；(2) SMP 在 MBR 中对出水水质的影响；(3) SMP 对膜污染的影响。

响。SMP在MBR中由于膜的截留作用而被积累,同时积累的溶解性的代谢产物是可以被生物降解的,尽管这需要很长的适应期。同时SMP在MBR中的积累也与膜表面形成的凝胶层有关。而凝胶层主要是由大量的SMP作用于膜表面而形成。另外,积累的代谢产物限制了活性污泥的代谢活性,积累的代谢产物浓度越高,影响越明显^[3]。由于SMP是生物处理过程中出水COD和BOD的重要组成部分,因此文献^[14]提出了一种建立在SMP形成和降解平衡基础上的MBR动力学模型,从理论和实验两方面证明了在出水中大部分有机物质是SMP,这个结论与许多研究者的研究一致。EPS指微生物代谢基质过程中的产物,包括细胞活动分泌物、细胞表面脱落物、细胞溶解或水解产物等。包括溶解性ESP(suspended EPS)和黏附在细胞壁上的EPS(extractable EPS)。EPS的作用使微生物在稳定混合的高细胞密度的生物群落中连续生存,换句话说EPS是一种在微生物聚集体中允许细胞相互合作和交流的媒介。黏附在细胞壁上的高浓度EPS可以使微生物形成更大的絮体,使污泥更容易被膜分离。EPS在混合液中膜上积累,引起了混合液粘度的增加和膜的过滤阻力的增加。EPS的比阻力为 $10^{16} \sim 10^{17}$ m/kg。

综上所述,在膜生物反应器中,由于膜的截留作用,世代周期较长的硝化细菌、不易沉降的菌种的数量明显高于传统的活性污泥反应器;而由于剪切力的作用,微型动物存在的数量与类型比传统的活性污泥反应器少;而由于低的F/M和长的SRT,微生物的活性低于传统的活性污泥反应器;但由于MBR中污泥浓度较高,使得MBR处理污水的潜力巨大。另外,由于膜生物反应器对微生物来说是一个封闭的系统,使得其中的微生物产物积累,成为影响出水水质及膜污染的重要因素,因此对微生物产物的研究将成为膜生物反应器研究的一个重点内容。

参考文献

- [1] Rosenberger S, Kruger U, Witzig R, *et al.* Water Research, 2002, 36 (2): 413~420.
- [2] Canales A, Pareilleux A, Luc R J, *et al.* Water Science and Technology, 1994, 30 (8): 97~106.
- [3] Zhang B, Kazuo Y. Water Science and Technology, 1996, 34 (5~6): 295~302.
- [4] Witzig R, Manz W, Rosenberger S, *et al.* Water Research, 2002, 36 (2): 394~402.
- [5] Xing C, Kazuo Y, Wen X H, *et al.* Journal of Membrane Science, 2001, 191 (1~2): 31~42.
- [6] Fan X, Vincent U, Qian Y, *et al.* Water Science and Technology, 1996, 34 (1~2): 129~136.
- [7] 魏源送, 郑祥. 工业水处理, 2003, 23 (1): 1~7.
- [8] Wen X, Xing C, Qian Y, *et al.* Process Biochemistry, 1999, 35 (3~4): 249~254.
- [9] Chaize S, Huyard A. Water Science and Technology, 1991, 23 (7~9): 1591~1600.
- [10] Frohnd B, Keiding K. Water Science and Technology, 1994, 29 (7): 137~141.
- [11] Noguera D, Araki N, Rittmann B, *et al.* Biotechnology and Bioengineering, 1994, 44 (9): 1040~1047.
- [12] Namkung E, Rittmann B. Water Research, 1986, 20 (6): 795~806.
- [13] Barker D, Stuckey D. Water Research, 1999, 33 (14): 3063~3082.
- [14] Lu S, Imai T, Jkita M, *et al.* Water Research, 2001, 35 (8): 2038~2048.