

膜生物反应器中进水组成对膜污染的影响

纪磊, 周集体, 张秀红, 肖敏

(大连理工大学环境与生命学院, 大连 116023)

摘要:研究了膜生物反应器中进水组成对膜污染的影响. 结果表明, 相对于正常组成来说进水中限氮或限磷引起的膜污染程度更重, 尤以进水中限氮时更为严重. 系统缺氧或缺磷时, 污泥絮体的相对憎水性和膜的憎水性增加, 使得膜和污泥之间的憎水相互作用增强, 加速了污染物在膜表面的沉积和/或吸附. 另外, 进水中限氮或限磷时, 污泥中丝状菌的数量增加, 把颗粒污泥捆扎、束缚在其立体网状结构中, 滤层结构更加致密, 孔隙度减小, 增加了膜污染阻力; 丝状菌的作用还在于它们能够将污染物牢牢地缠绕、固定在膜表面, 加强了膜表面污染物抵御曝气的水力冲刷作用的能力, 从而也加速了膜污染.

关键词:膜生物反应器; 膜污染; 进水组成; 丝状菌; 憎水性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)01-0131-06

Influence of Influent Composition on Membrane Fouling in Membrane Bioreactors

Ji Lei, ZHOU Ji-ti, ZHANG Xiu-hong, XIAO Min

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

Abstract: Effect of influent composition on membrane fouling in membrane bioreactors was investigated. Experiment results show that nitrogen deficiency or phosphorus deficiency influent can cause severer membrane fouling than normal influent, especially for the nitrogen deficiency. When the system lacks nitrogen or phosphorus, both the relative hydrophobicity of sludge flocs and membrane hydrophobicity increase, enhancing the hydrophobic interactions between the membrane and sludge and thus accelerating the deposition and/or adsorption of foulants on membrane surface. In addition, in the case of nitrogen deficiency or phosphorus deficiency, the number of filamentous bacteria in sludge rises, which bind and fix particle sludge to their three-dimensional meshwork, leading to more compact cake layer with lower porosity and thus greater fouling resistance. Filamentous bacteria also strengthen the attachment of foulants on membrane surface to resist the scour of aeration, accelerating membrane fouling.

Key words: membrane bioreactor; membrane fouling; influent composition; filamentous bacteria; hydrophobicity

膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)相对于传统的活性污泥法来说, 具有出水质量好、占地面积小等优点, 因而备受关注. 但它的一个突出的缺点是膜污染. 膜污染使得过滤通量下降, 操作成本增加, 制约了 MBR 的进一步发展及广泛应用^[1]. 要有效地控制膜污染, 首先要深入理解膜污染的机理. 膜污染的影响因素很多, 一般包括膜的特性(如膜的材质^[2]、孔径^[3]和憎水性^[4])、操作方式(如间歇出水^[5]、临界膜通量下的恒通量操作^[6])以及操作条件(如膜表面的错流速度^[7]、污泥停留时间^[8]、污泥浓度^[9]、污泥粒度分布^[10]与污泥的憎水性、表面电荷及微生物活性^[8]等). 然而, 有关 MBR 中进水组成(如 COD:N:P)对膜污染的影响的报道却很少见.

碳源、氮源和磷源是微生物生长、繁殖所必需的 3 种基本营养物质. 但是许多工业废水(如食品工业废水、酿造废水、制药废水、皮革废水和化工废水等)都存在氮、磷营养元素缺乏的问题^[11]. 而当前 MBR 在工业废水处理领域的应用范围正在不断拓宽^[12]. 当 MBR 中缺氧或缺磷时, 微生物的生长特性(如微

生物的活性、群落及数量等)可能会发生相应的变化, 进而对膜污染产生影响. 为此, 本研究考察了进水组成限氮或限磷时, MBR 中的微生物特性以及对膜污染的影响, 探讨了其膜污染的机理, 以期对膜污染的防治、延长膜的使用寿命、降低操作成本以及促进 MBR 的推广应用提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置及条件

在本试验中, 3 套完全相同的 MBR 并列运行. 如图 1 所示, 在每套 MBR 中, 中空纤维帘式膜组件浸没在有效容积为 9 L 的有机玻璃生物反应器中. 所用膜组件(杭州浙大凯华公司提供)的膜过滤面积为 0.15 m², 膜孔径为 0.1 μm, 材质为聚丙烯. 膜组件下置曝气管, 为微生物供氧, 同时冲刷膜表面, 以减缓膜的污染. 膜出水由蠕动泵抽吸, 并保持出水通量恒定在 8 L/(m²·h), 出水泵按开 12 min, 停

收稿日期: 2006-02-20; 修订日期: 2006-05-01

作者简介: 纪磊 (1974~), 男, 博士, 主要研究方向为水污染控制,
E-mail: geel@sina.com

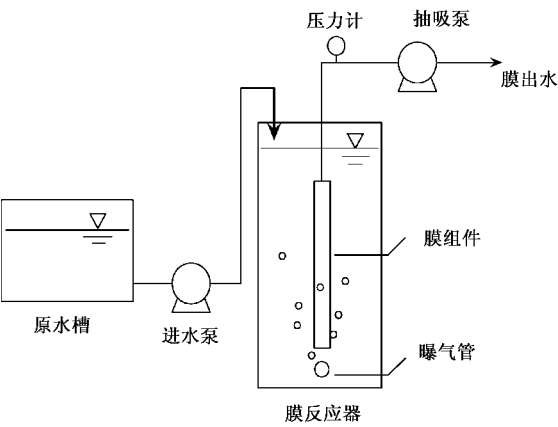


图 1 试验装置
Fig.1 Schematic diagram of the apparatus

2 min自动控制.水力停留时间为 8.8 h,系统不排泥.通过自动液位控制器来保持反应器的液位恒定.反应器内的温度通过自动温控装置维持在 21℃ 左右.

MBR 的进水采用人工配水,其组成包括蔗糖、尿素、 KH_2PO_4 和一定量的微量元素.进水 COD 刚开始控制在 300 mg/L 左右,从第 57 d 后改为约 450 mg/L 左右.通过控制尿素和 KH_2PO_4 的加入量使得 3 个 MBR 中的进水组成 COD:N:P 分别为 100:5:1 (正常),100:1:1(限氮),100:5:0.2(限磷).用 NaHCO_3 调节进水 pH 值为 7 左右.

本试验所用活性污泥取自大连春柳河污水处理厂,分别在各自的 MBR 中(采用各自的操作条件)驯化约 2 周后,将 3 个 MBR 中的初始污泥浓度都调整为 2.0 g/L,并把膜组件更换为洁净的膜组件,计 时为 0 d 开始数据测定.

1.2 分析方法

本试验用 U 形管水银压力计测定膜过滤压差来表征膜污染的大小.污泥絮体的相对憎水性的测定方法见文献[13].膜纤维的憎水性用其动态接触角来表征,所用仪器及测定方法见文献[14].污泥絮体的相对憎水性和膜纤维的憎水性均取 3 次测量的平均值,其标准偏差分别为 3%~5% 和 4%~7%.

污泥絮体的形状用光学显微镜(Olympus, BH2-RFCA)来观察.膜表面的微观形态用扫描电子显微镜(JEOL JSM -5600LV, Tokyo, Japan)来观察,其中污染后膜的样品取自操作周期末.

2 结果与讨论

2.1 进水组成对污泥浓度和出水水质的影响

本试验对 3 个 MBR 中的活性污泥浓度进行了监测.整个运行过程(持续时间长达 90 d)没有排泥.由图 2 可见,进水正常和限磷的 MBR 的污泥浓度在整个过程中保持了较快的增长速度,最后达到了 8 g/L 左右.而进水限氮的 MBR 中,污泥浓度增长缓慢,最后只达到了约 5~6 g/L.这是由于氮元素是微生物合成蛋白质必不可少的重要原料,氮源不足,微生物正常的生长代谢必然要受到很大影响.这从污泥颜色和形态的变化也可以反映出来:在进水限氮的 MBR 中,污泥颜色和形态从最初的土黄色颗粒状污泥逐渐变为灰白色的以丝状菌为主体的污泥,用目测都可知其污泥浓度很低.而另外 2 个 MBR 中的污泥形态在整个操作过程中始终变化较小:进水正常的 MBR 中的污泥基本保持颗粒状形态;进水限磷的 MBR 在运行后期(约 50 d 后),污泥中丝状菌数量逐渐开始增多,但增长较缓慢,变化不明显.这 2 个 MBR 中的污泥颜色的变化都较小,呈土黄色,其中进水限磷的 MBR 的污泥颜色稍浅一点.

另外,本试验是在对接种污泥驯化 2 周后,开始数据测定的,整个操作过程实际运行时间在 100 d 以上.虽然系统没有排泥,到本试验末还是可以认为近似接近于稳态.3 个 MBR 对 COD 的去除效果,从最初的波动较大,到最后相对地稳定于各自的平衡点,也说明了这一点.事实上,对于不排泥的系统,到一定操作时间后,污泥特性的变化就相对较小了. Pollice 等^[15]和 Wen 等^[16]的实验数据也证实了这一点.

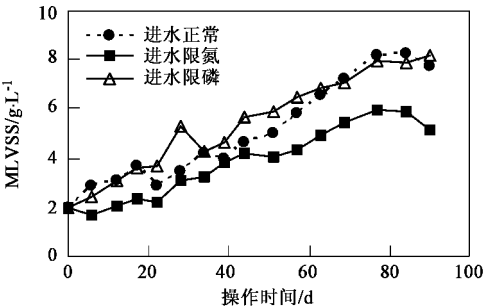


图 2 3 个 MBR 中的 MLVSS 浓度随时间的变化
Fig.2 Changes of MLVSS concentrations over time in three MBRs

本试验对进水和膜出水的 COD 进行了检测,每天测 1 次,2 个阶段分别运行稳定后的测定结果如表 1 所示(表 1 中数据表示为时间平均值 ± 1 个标准差).由表 1 可见,在进水组成正常和进水限磷

的 MBR 中, 2 个阶段的膜出水的 COD 都较低, 平均去除率在 97% 以上. 而进水限氮的 MBR 的 COD 去除效果较差, 平均去除率只有 88% 左右. 其原因可能是由于限氮时 MBR 中的污泥浓度较低, 以及污泥活性的降低.

由表 1 还可发现, 进水限磷比进水正常的 MBR 的 COD 去除效果还要稍好一些, 这个现象无法从微生物的活性得到解释. 可能的原因是: 进水限磷时, MBR 中的丝状菌的相对含量较高, 使得膜表面滤饼层的结构更加致密, 孔隙减小(此部分内容详见 2.2 和 2.4 节, 在此先用其试验结果). 因为膜表面的滤饼层对污染物具有截留和/或吸附的作用^[17], 在滤饼层孔隙减小时, 其对 MBR 中污染物的截留和/或吸附作用增强, 从而使得膜出水的 COD 减小.

表 1 3 个 MBR 中的进水和出水的水质 /mg·L⁻¹

Table 1 Quality of the influents and effluents in three MBRs/mg·L⁻¹

测定水样	COD	
	阶段 1(39 ~ 57 d)	阶段 2(70 ~ 90 d)
进水	300 ± 15	450 ± 20
进水正常的出水	9.5 ± 4.0	14.1 ± 4.5
进水限氮的出水	36 ± 12	48 ± 15
进水限磷的出水	5.1 ± 1.5	7.3 ± 3.5

2.2 进水组成对污泥中丝状菌丰度指数的影响

丝状菌丰度指数表示的是活性污泥中丝状菌的相对含量的大小. 由图 3 可见, MBR 的进水组成对

丝状菌丰度指数有重要影响. Jenkins 等^[18]将丝状菌的丰度指数分为 7 个等级, 按照由小到大的顺序: 1 为没有丝状菌; 2 为很少量; 3 为有一些; 4 为较多; 5 为很多; 6 为大量; 7 为过量. 按照这个标准, 可以大致估计出 3 个 MBR 的丝状菌丰度指数. 在进水组成正常的 MBR 中, 颗粒状细菌占绝大多数, 丝状菌数量很少, 所以丰度指数约为 2; 而在进水限氮的 MBR 中, 可以看到丝状菌数量很多, 在其空间网状结构中, 缠绕、包裹着少量的颗粒状污泥, 所以丰度指数约为 5; 对于进水限磷的 MBR 来说, 丝状菌数量也较多, 其丰度指数约为 4.

需要说明的是, 以上对丝状菌丰度指数的分析, 并不是特别精确, 但对 3 个 MBR 的丝状菌丰度指数的相对大小的判别却是确定的: 进水限氮 > 进水限磷 > 进水正常.

另外, 由图 3 也可看出, 3 个 MBR 中的污泥絮体的大小和形状也不一样. 在进水组成正常的 MBR 中, 丝状菌数量很少, 污泥粒径较小, 形状较为规则. 而在限氮或限磷的 MBR 中, 由于丝状菌把颗粒状污泥连接、缠绕在了其网状结构中, 所以污泥絮体的体积较大, 形状也呈不规则的蓬松的网状.

2.3 进水组成对污泥絮体的相对憎水性和膜的憎水性的影响

进水组成也会影响污泥絮体的相对憎水性. 由

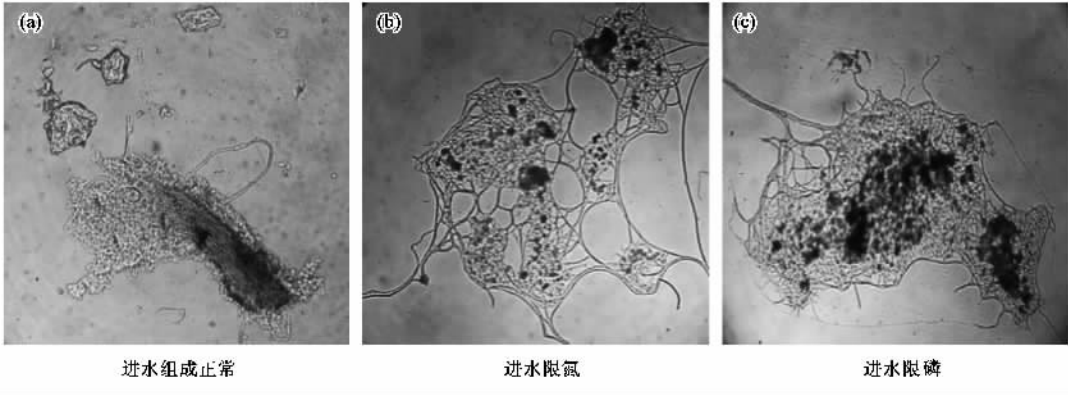


图 3 光学显微镜下 3 个 MBR 中污泥絮体的形状(×400)

Fig.3 Microscopic images of sludge flocs in three MBRs (×400)

图 4 可见, 在进水组成正常的 MBR 中, 污泥絮体的相对憎水性最小; 进水限磷的 MBR 中的絮体的相对憎水性较高; 而当进水中限氮时, 絮体的相对憎水性最高. 随着丝状菌丰度指数的增加, 污泥絮体的相对憎水性增加, 二者成正相关性.

与此相对应, 进水组成对膜的憎水性也有重要影响. 由图 5 可见, 膜污染之后, 其动态接触角增

大, 即膜的憎水性增加. 其中, 进水组成正常时, 膜污染后的憎水性的增大量较小; 限氮或限磷时, 憎水性增大量较多, 尤以限氮时增大得最多. 这一结果与图 4 是一致的, 反应器中污泥的相对憎水性越高, 则污染后的膜的憎水性也越高.

2.4 进水组成对膜污染的影响

本试验运行时间为 90 d. 每次当膜过滤压差达

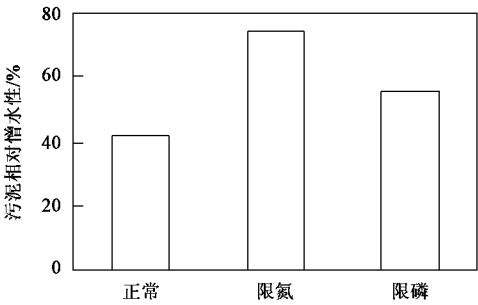


图 4 进水组成对污泥絮体的相对憎水性的影响
Fig.4 Influence of influent composition on relative hydrophobicity of sludge flocs

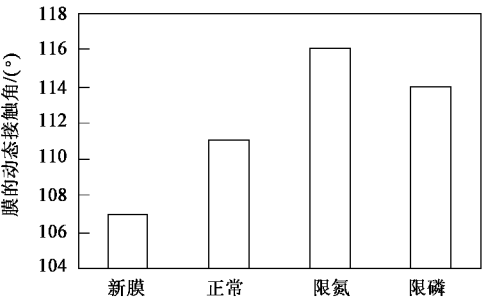


图 5 新膜和污染后的膜的动态接触角
Fig.5 Dynamic contact angles of nascent membrane and fouled membranes

到 65×10^3 Pa 左右时, 暂停抽吸, 将膜组件取出, 用物理清洗方法(先用 $5 \sim 6$ m/s 的水流冲洗 15 min, 再在 2.5×10^5 Pa 下水反冲洗 15 min)去除膜的可逆污染后, 把膜组件装好, 继续操作. 本试验把膜表面冲洗下来的泥饼混合液, 除少量用作分析外, 其余的都返回到了反应器中, 所以不会对污泥浓度造成影响.

为了阐明问题的方便, 这里把连续 2 次物理清洗之间的时间间隔定义为 1 个操作周期. 由图 6 可见, 进水组成对膜污染有重要影响. 进水组成正常的 MBR, 膜污染最慢, 进水限氮或限磷均会加速膜的污染, 尤其进水限氮时膜污染更快.

另一方面, 在 3 个 MBR 中, 随操作时间的延长, 操作周期的长度总体上是减小的, 即膜污染速率在逐渐增大. 在 1 个操作周期中, 膜过滤压差先缓慢增大, 达到一定数值后开始迅速增大, 呈现 2 阶段性. 但在运行后期, 膜过滤压差增加速率变大, 缓慢增加阶段变得不明显. Jiang 等^[19]也观察到类似的现象, 他们认为这是由于膜的不可逆污染阻力随时间的逐渐积累, 而不可逆污染可能是由于膜

对大分子有机物(包括溶质以及大小和膜孔径相当或小于膜孔径的胶体物质)的吸附作用所引起.

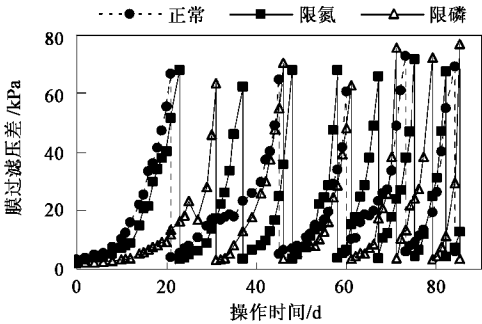


图 6 3 个 MBR 中的膜过滤压差随时间的变化
Fig.6 Changes of transmembrane pressure over time in three MBRs

由图 6 还可发现, 在第 1 个操作周期内, 进水限磷的 MBR 运行时间最长, 而进水限氮及进水正常的 MBR 的差别较小. 这可能是由于膜的初始状态的差别所引起. 进水限氮和限磷的 MBR 在试验开始时使用的是新膜, 自然没有污染, 在保持恒通量为 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时, 其初始膜过滤压差均为 2.27×10^3 Pa. 而进水正常的 MBR 使用的膜虽然和上述 2 个膜完全一样, 但却是使用过的, 在经过了物理清洗和化学清洗后, 在保持恒通量为 $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时, 其初始膜过滤压差为 3.47×10^3 Pa. 这表明清洗不够彻底, 膜表面和/或膜孔内还残留少量的污染物. 原估计差别不大, 但是经过一段时间后发现, 膜的初始状态的差异对膜过滤还是造成了一定影响, 即进水正常的 MBR 的第 1 个操作周期要比另外 2 个 MBR 的短. 由于在实验初始阶段, 3 个 MBR 的污泥特性的差别较小, 因而此时膜的初始状态就成为了膜过滤的主要影响因素.

不过, 随着操作时间的延长, 3 个 MBR 之间污泥特性的差别在逐渐增大, 从而最终成为了膜污染的主要影响因素. 对于限氮和限磷的 MBR 来说, 因其开始时使用的都是新膜, 膜污染速率的相对大小不会受到影响; 而对于进水正常的 MBR 来说, 尽管开始时使用的是旧膜, 膜过滤受到一定影响, 但这种因素的影响随时间的延长在逐渐减小. 随着操作的进行, 进水限氮和限磷的 MBR 中逐渐产生了丝状菌, 污泥的相对憎水性和膜的憎水性也在逐渐增大, 对膜过滤造成了很大影响, 加快了进水限氮和限磷的 MBR 的膜污染速率, 从而使得进水正常的 MBR 成为了膜污染最慢的.

可以推测, 如果进水正常的 MBR 在实验开始

时也用新膜,其第 1 个操作周期应该更长一些,有可能是 3 个反应器中最长的. 因此,进水正常的 MBR 在实验开始时使用旧膜,尽管对其初始膜污染速率造成了一定影响,但这并不影响 3 个 MBR 之间的膜污染速率相对大小的比较.

图 7 是新膜和污染后的膜(分别取样自各个 MBR 的最后 1 个操作周期之末)的扫描电子显微镜图像. 在新膜的表面,可以观察到均匀分布着许多微孔. 而污染后的膜表面由于操作时间较长,都被污泥所覆盖,看不到微孔. 其中,进水正常的 MBR 中,膜表面

可以观察到许多的球形细菌和很少量的丝状菌,膜面滤层结构较为疏松,孔隙较多. 而在进水限氮和进水限磷的 MBR 中,膜表面所覆盖的滤饼层则比较致密,孔隙较少. 在进水限氮的 MBR 的膜表面,可以看到大量的丝状菌将少量的球状菌捆扎、覆盖在里面,形成结构紧密的滤饼层;而进水限磷时,膜表面的丝状菌则较少一些,这和图 3 的观察结果是一致的. 有关报道^[20]也表明,MBR 中的丝状菌会通过颗粒污泥污染层表面覆盖、捆绑等形式,在膜表面形成致密的污染层,缩短膜过滤周期.

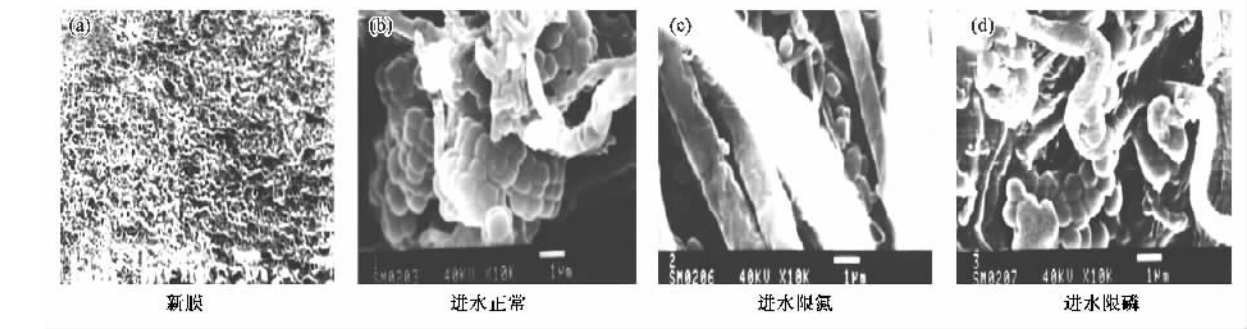


图 7 新膜和污染后的膜的表面的扫描电镜图像 (×5 000)
Fig.7 SEM images showing the surfaces of nascent membrane and fouled membranes (×5 000)

2.5 进水组成对膜污染的影响的解释

由上可知,MBR 的进水中限氮或限磷均会加重膜的污染,尤以限氮时更为严重. 这是因为,相对于正常组成的进水来说,进水中限氮或限磷时,污泥絮体的相对憎水性和膜的憎水性都增加,则膜与污泥之间的憎水相互作用增强,从而加速了污染物在膜表面的沉积和/或吸附. 同理,与限磷时相比,限氮时污泥絮体的相对憎水性及膜的憎水性较高,从而膜与污泥之间的憎水相互作用较强,也使得限氮时的膜污染速率更高.

另外,系统缺氮或缺磷时,污泥中丝状菌的数量增多. 丝状菌将颗粒状污泥紧密地捆扎、束缚在其立体网状结构中,滤层结构变得更加致密,孔隙度减小,导致膜污染阻力增加. 丝状菌的作用还在于它们能够将其空间网状结构牢牢地缠绕、固定在膜表面,从而加强了膜表面污染物抵御曝气的水力冲刷作用的能力,这也加速了膜的污染.

综上所述,在实际操作中,当系统缺氮或缺磷时,有必要及时、适量地加以补充,以维持微生物的营养均衡和正常的生长状态,避免其对膜污染以及出水水质的不利影响.

3 结论

(1) 在 MBR 中,进水组成对膜污染有重要影响. 在其它试验条件相同时,进水组成中限氮或限磷均会加重膜的污染,尤以限氮时更为严重.

(2) 系统中缺氮或缺磷时,污泥絮体的相对憎水性和膜的憎水性都增加,使得污泥与膜之间的憎水相互作用增强,加速了污染物在膜表面的沉积和/或吸附.

(3) 系统中缺氮或缺磷时,污泥中丝状菌的相对含量增加. 丝状菌把颗粒状污泥捆扎、束缚在其立体网状结构中,滤层结构变得更加致密,孔隙度减小,增加了膜污染阻力. 此外,丝状菌还将污染物牢牢地缠绕、固定在膜表面,加强了膜表面污染物抵御曝气的水力冲刷作用的能力,从而也加速了膜的污染.

参考文献:

[1] Mukai T, Takimoto K, Kohno T, *et al.* Ultrafiltration behaviour of extracellular and metabolic products in activated sludge system with UF separation process [J]. Water Res., 2000, 34(3): 902 ~ 908.

- [2] Kang I J, Yoon S H, Lee C H. Comparison of the filtration characteristics of organic and inorganic membranes in a membrane-coupled anaerobic bioreactor [J]. *Water Res.*, 2002, **36**(7): 1803 ~ 1813.
- [3] Bae T H, Tak T M. Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor [J]. *J. Membr. Sci.*, 2005, **264**(1 ~ 2): 151 ~ 160.
- [4] Yu H Y, Xie Y J, Hu M X, *et al.* Surface modification of polypropylene microporous membrane to improve its antifouling property in MBR: CO₂ plasma treatment [J]. *J. Membr. Sci.*, 2005, **254**(1 ~ 2): 219 ~ 227.
- [5] Hong S P, Bae T H, Tak T M, *et al.* Fouling control in activated sludge submerged hollow fiber membrane bioreactors [J]. *Desalination*, 2002, **143**(3): 219 ~ 228.
- [6] Defrance L, Jaffrin M Y. Comparison between filtrations at fixed transmembrane pressure and fixed permeate flux: application to a membrane bioreactor used for wastewater treatment [J]. *J. Membr. Sci.*, 1999, **152**(2): 203 ~ 210.
- [7] Liu R, Huang X, Wang C, *et al.* Study on hydraulic characteristics in a submerged membrane bioreactor process [J]. *Process Biochem.*, 2000, **36**(3): 249 ~ 254.
- [8] Lee W, Kang S, Shin H. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors [J]. *J. Membr. Sci.*, 2003, **216**(1 ~ 2): 217 ~ 227.
- [9] Chang I S, Kim S N. Wastewater treatment using membrane filtration-effect of biosolids concentration on cake resistance [J]. *Process Biochem.*, 2005, **40**(3 ~ 4): 1307 ~ 1314.
- [10] Bai R, Leow H F. Microfiltration of activated sludge wastewater — the effect of system operation parameters [J]. *Separ. Purif. Technol.*, 2002, **29**(2): 189 ~ 198.
- [11] 陈滢, 彭永臻, 刘敏, 等. 营养物质对污泥沉降性能的影响及污泥膨胀的控制 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 54 ~ 58.
- [12] Yang W, Cicek N, Ilg J. State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America [J]. *J. Membr. Sci.*, 2006, **270**(1 ~ 2): 201 ~ 211.
- [13] Wil'en B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties [J]. *Water Res.*, 2003, **37**(9): 2127 ~ 2139.
- [14] Ji L, Zhou J. Influence of aeration on microbial polymers and membrane fouling in submerged membrane bioreactors [J]. *J. Membr. Sci.*, 2006, **276**(1 ~ 2): 168 ~ 177.
- [15] Pollice A, Laera G, Blonda M. Biomass growth and activity in a membrane bioreactor with complete sludge retention [J]. *Water Res.*, 2004, **38**(7): 1799 ~ 1808.
- [16] Wen X, Ding H, Huang X, *et al.* Treatment of hospital wastewater using a submerged membrane bioreactor [J]. *Process Biochem.*, 2004, **39**(11): 1427 ~ 1431.
- [17] Chang I S, Bag S O, Lee C H. Effects of membrane fouling on solute rejection during membrane filtration of activated sludge [J]. *Process Biochem.*, 2001, **36**(8 ~ 9): 855 ~ 860.
- [18] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. *Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming* [M]. Lafayette, CA: Ridgeline Press, 1986.
- [19] Jiang T, Kennedy M D, van der Meer W G J, *et al.* The role of blocking and cake filtration in MBR fouling [J]. *Desalination*, 2003, **157**(1 ~ 3): 335 ~ 343.
- [20] 王勇, 孙寓姣, 黄霞. 丝状菌对膜-生物反应器中膜污染过程的影响 [J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(2): 247 ~ 251.