

微网生物动态膜过滤性能的研究

范彬¹, 黄霞¹, 文湘华¹, 于妍² (1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 中国矿业大学(北京校区)化学与环境工程系, 北京 100083)

摘要:采用普通微网材料加工的过滤组件与生物反应器一起构成动态膜-生物反应器,研究了微网上所形成的生物动态膜的过滤性能.生物动态膜所具有的较强截留能力主要是由附着的凝胶层产生.动态膜对相对分子质量 $< 3 \times 10^3$ 至 $> 1 \times 10^5$ 的各个级别的溶解性有机物都有 30% ~ 60% 的截留率,但过滤的精度并不很高,不能完全截留相对分子质量大于 1×10^5 的溶解性有机物.已经覆盖有凝胶层的膜片与未使用过的新膜片的清水过滤阻力几乎相等,约为 $1.9 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$.由滤饼产生的过滤阻力占运行中动态膜片总过滤阻力的绝大部分.新膜片在清水通过时有明显的初始阻力,而有凝胶层覆盖时的膜片几乎没有初始过滤阻力.

关键词:生物动态膜;有机物截留;分子量分布;过滤阻力

中图分类号:X703.3 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)01-07-0091

Filtration Capability of the Bio Dynamic Membrane

Fan Bin¹, Huang Xia¹, Wen Xianghua¹, Yu Yan² (1. Dept. of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Dept. of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining Technology (Beijing School), Beijing 100083, China)

Abstract: The filter modules made of common mesh material were submerged in to a bioreactor to form a dynamic membrane bioreactor. This paper studied the filtration capability of the dynamic bio-membrane forming on 100-micron Dacron mesh material. The outstanding solid-liquid separation capability of the dynamic bio-membrane was mainly contributed to the gel-layer attaching on the mesh material. The dynamic bio-membrane could checked 30% ~ 60% TOC of various molecule weights ranging < 3000 to $> 10^5$, whereas its separation accuracy was not high enough to intercept all the organics of molecules weights larger than 10^5 . The tap water filtration resistance of the dynamic bio-membrane sheet with gel-layer attaching on was about $1.9 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$, which almost equaled to that of the untapped sheet. The resistance caused by cake-layer contributed about 70% to the total filtration resistance of the dynamic bio-membrane on working. The untapped dynamic bio-membrane sheet showed an initial resistance to tap water permeation, but the one with gel-layer attaching on had little initial resistance. The reason might be that the gel-layer eliminated the hydrophobicity of the mesh material.

Key words: bio-dynamic membrane; rejection to organics; molecule weight distribution; filtration resistance

膜-生物反应器(membrane bioreactor, MBR)是膜分离与生物反应器相组合的一种污水处理新工艺.但迄今为止,还鲜见 MBR 工艺在大型污水处理中应用的实例.原因是多方面的,但膜组件的成本过高是关键所在.

动态膜-生物反应器(DMBR)的污水处理工艺具有大幅降低膜组件成本的可能^[1].该工艺以大孔径($10^2 \mu\text{m}$ 级,相对于微滤膜而言)的普通过滤材料(称之为基材,如筛网)加工的组件来构造动态膜-生物反应器.动态膜过滤的基本原理是:在混合液通过基材进行过滤时,基材的表面会逐步形成生物质层,这一生物质层具备

类似于传统滤膜的截留作用,称为生物动态膜(dynamic bio-membrane, DMB),相应的过滤操作称为(生物)动态膜过滤.应用 DMBR 处理城市污水的研究表明,生物动态膜过滤保留了膜过滤的绝大部分优点,但所需的过滤压力小得多,膜污染的控制也更为简单.本文为进一步阐明 DMBR 的过滤机理,对生物动态膜的形态与组成、过滤阻力和截留性能进行了研究.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50178039)

作者简介:范彬(1969~),男,博士.

收稿日期:2002-01-16;修订日期:2002-05-08

1 材料和方法

1.1 DMBR 的运行

关于 DMBR 的构成、运行方法以及运行的效果可参见文献[1]. DMBR 的进水来自于清华大学校内北区的污水泵站,该污水主要是由学生宿舍区、部分家属区、教学区、食堂以及实验室污水组成, COD 浓度在 150 ~ 400 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度为 40 ~ 60 mg/L. DMBR 的主要运行参数: SRT 为 40 ~ 47 d, 稳定运行时 MLSS 浓度为 7000 ~ 8000 mg/L, HRT = 3.5 h, 反应器内溶解氧(DO) 的浓度控制在 2 ~ 4 mg/L.

1.2 动态膜的清水透过性试验

动态膜的清水透过性试验装置如图 1 所示,所用的清水为实验室自来水. 试验槽的横截面积为 0.35 m², 进行透过性试验时每次出水的体积控制在 200 mL 以下, 每次试验后均将出水返回试验槽中以保持槽中的液面高度, 因此试验过程中因出水引起的出水水头的降低小于 0.057 cm, 相对于试验中的出水水头高度(最低为 1 cm) 而言误差小于 3%. 通过加減水的方法改变出水水头, 即每增加或减少 3500 mL 水, 出水水头增加或减少 1 cm.

在下次反冲(2 次反冲间隔 24h) 开始前从反应器中取出一个动态膜片, 按照图 1 所示安装于试验装置中, 在此过程中尽量避免对膜片表面生物质层的破坏. 打开出水口, 按前述方法测量流出一定体积(< 200 mL) 所需时间. 计算得相应出水水头差下的通量. 未使用过的新膜片直接进行上述试验.

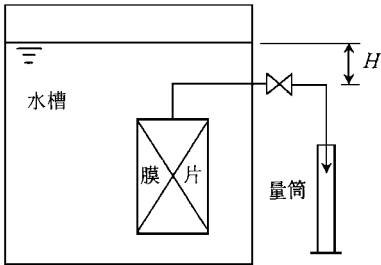


图 1 清水通透性试验装置

Fig.1 Schematic of the experimental settings for tap water permeability experiment

1.3 动态膜形态的观察

如 1.2 节所述, 将动态膜片取出, 观察其表面形态并拍照. 在进行了 1.2 节的试验后, 从膜片上取样, 分别在光学显微镜(MOTIC-B, 麦克奥迪实业集团有限公司) 下观察和进行扫描电镜试验. 在扫描电镜的试验之前, 样品经过以下前处理过程: ①戊二醛- 锇酸双固定: 2.5 % 戊二醛, 固定 4h, pH7.0 的磷酸盐缓冲溶液洗 3 次, 每次 10 min; 1 % 的 OsO_4 溶液固定 4h, pH7.0 的磷酸盐缓冲溶液洗 3 次, 每次 10 min. ②脱水: 采用乙醇系列脱水, 乙醇系列依次为 30 %、50 %、70 %、85 %、95 %, 每种浓度的乙醇各用一次(脱水 15 min); 最后采用 100 % 的乙醇脱水 2 次, 每次 15 min. ③醋酸异戊酯作置换. ④二氧化碳临界点干燥. ⑤喷金: 采用 EIKO IB-3 ION COATER 仪, 作离子溅射金. 处理后的样品在扫描电镜下进行观察并拍照(HITACHIS-570 扫描电镜). 作为对比, 未使用的基网在光学显微镜下拍照.

1.4 动态膜截留能力的评价

对 DMBR 的上清液和出水中的有机碳进行分子量的测定. 采样和测定方法: ①上清液水样取自反应器混合液经定性滤纸过滤后的滤液, 出水水样直接取自反应器的出水口. ②将孔径为 0.22 μm 的微滤膜和切割分子量分别为 3000 $\text{A} \times 10^5$ 、3 $\times 10^5$ 、6 $\times 10^5$ 和 10 $\times 10^5$ 的超滤膜(中科膜公司, 北京) 用高纯水煮沸 3 次, 每次 30 min, 然后用高纯水冲洗膜的表面, 浸泡在高纯水中待用. ③用容积为 500 mL 的压滤器(中科膜公司, 北京) 对样品进行压滤; 以高压氮气作为压力源, 向压滤器中加入 300 mL 高纯水, 逐渐加大压力使滤液呈滴状快速流出, 滤出 250 mL, 剩余部分弃去; 加入待过滤液过滤, 控制过滤压力小于 2 bar, 弃去开始的 30 mL 滤液和最后 30 mL 母液; 收集滤液, 取 5 mL 留待分析, 其余部分进行下一个分子量级别滤膜的过滤. ④按步骤 3 和 4, 依次通过如步骤 2 所述滤膜进行过滤. ⑤对各部分滤液进行 TOC 分析(岛津 TOC-500), 分析方法见文献[2].

2 结果和讨论

2.1 动态膜的形态与组成

研究中使用的动态膜基材为涤纶(聚酯)材料网,未投入使用的新鲜网面如图 2 所示.使用中动态膜基材的表面有明显的生物层.膜片的外周接近框架的部分生物层较厚,在其覆盖下已看不到下面的基网;而膜片的中间部分比较薄,可以清晰地看到基网.从外观结构看,生物层由外向里(相对于基网)可以分为滤饼层和凝胶层.所谓滤饼层是一层疏松的污泥层,初步判断滤饼层主要由污泥絮团组成,与下层的结合很弱,将膜片从反应器中轻轻取出的过程中,大部分的滤饼层已经脱落.将取出的膜片浸入清水中并缓慢地上下移动数次,残留的滤饼层几乎完全分散脱落.滤饼层脱落后留下的

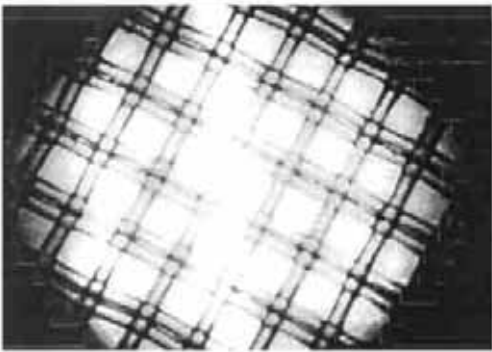


图 2 动态膜基材(放大 100 倍)
Fig.2 An 100-time picture of the supporting material of the bio-dynamic membrane

生物层称为凝胶层,如图 3 所示.感观上凝胶层呈胶状,肉眼观察不到颗粒状污泥的存在.凝胶层与动态膜基结合较紧密,需要用高速水流冲刷才能部分去除.在光学显微镜下观察到在基网的网丝和网孔上“糊着”的凝胶样物质,其中网孔部分呈半透明状.图 4 和图 5 是扫描电镜照片.图 4 的下方是放大了 300 倍的图象,可以看到基网的经纬线和经纬线上以及网孔中覆盖的生物物质;其上方是下方矩形框内局部再放大 10 倍的图象,看起来网孔上覆盖的生物物质象“毛皮”一样.图 5 将图 4 上方局部再放大到 10^4 倍,可以清晰地看到“毛”由丝状菌组成,

其中也夹杂着球菌、杆菌和螺旋菌等,在背景中可以看到成片的、有不规则孔的象“皮”一样的东西.较大孔的直径在 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$,而更多不太分明的小孔的直径估计在 $0.1 \mu\text{m}$ 以下.

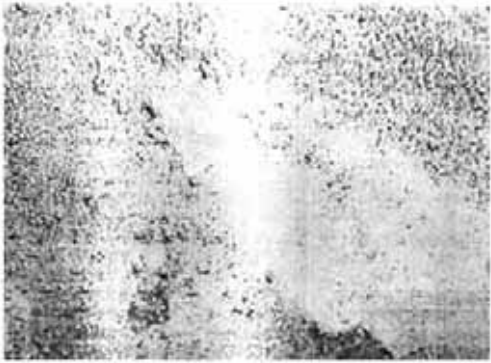


图 3 使用过的膜片(表面有凝胶层)
Fig.3 A picture of the used model with the gel layer attaching on

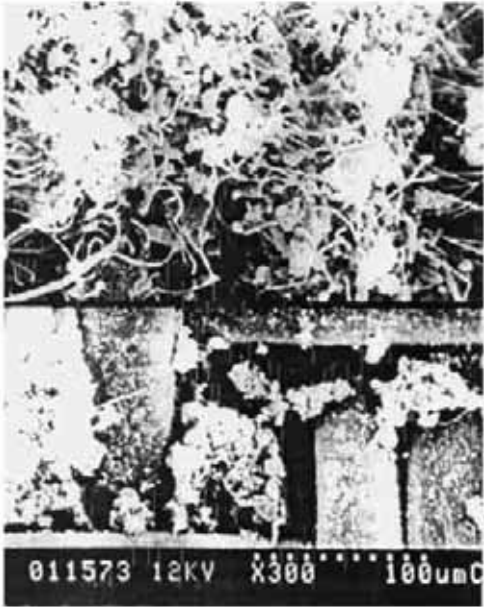


图 4 基材及其附着生物质的扫描电镜图
(下方是放大 300 倍图象,上方是局部放大到 3000 倍的图象)

Fig.4 A SEM picture of the mesh with biomass covering on

2.2 动态膜的截留能力

试验表明,动态膜对固体悬浮物有很好的截留作用,绝大多数情况下出水中的固体悬浮



图 5 将图 4 上方局部放大到 10^4 倍的扫描电镜图
Fig.5 A 10k-time SEM picture of the upper
part of Fig.4

物(SS)浓度为 $0^{[1]}$.在前文中曾经报道动态膜对溶解性的物质也有一定的截留作用,对上清液 COD 的去除率平均为 28.74%,对上清液 TOC 的去除率平均为 36.9%.为了进一步研究动态膜对溶解性物质的截留作用,本研究测定了反应器上清液和出水中 TOC 的相对分子质量分布,如表 1 所示.

表 1 DMBR 上清液和出水中总有机碳的分子量分布¹⁾
Table 1 Molecule weight distribution of organic carbon
in supernatant and effluent of the DMBR

相对分子质量 $\times 10^3$	上清液 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出水 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	截留率 / %
< 3	3.2	2.12	33.75
3 ~ 30	3.35	1.9	43.28
30 ~ 100	2.85	1.94	31.93
> 100	12.99	5.61	56.81
合计 ¹⁾	22.39	11.57	48.3

1) 通过 $0.45 \mu\text{m}$ 膜过滤后测定

表 1 表明,动态膜对上清液中各个分子量的物质都有一定的截留能力.分析动态膜对小分子物质所具有的截留作用与凝胶层有关,这

种现象在普通的 MBR 中也有发现.由于动态膜表面有比较多的生物质层,有点类似于生物滤池介质表面的生物膜,因此不排除一些小分子物质被生物吸附的可能性.另一方面,动态膜虽对小分子有截留能力,但对大分子(或颗粒)的截留能力却不十分理想,说明动态膜的分离精度比较有限.实际运行中,动态膜膜面的错流速度并不均匀,造成动态膜表面生物质层的厚度不一.并且膜面错流还造成膜面在法向的颤动现象,这种颤动对动态膜的形成有阻碍作用.动态膜片的中心部位的颤动幅度比边缘部位大,因此,实际运行中动态膜面中心部位的生物质层(包括凝胶层和滤饼层)明显比边缘部位薄.同时,不能排除动态膜片的一些地方有“漏洞”,即没有形成凝胶层或已形成的凝胶层受到破坏,导致动态膜对大分子溶解性有机物的总体截留效果不佳,甚至还会有固体物泄漏(虽然因实验精度,在测量出水 SS 时未必能表现出来).正因为如此,DMBR 出水中的总菌比较高,达到 1600 个/L .

2.3 动态膜的通透性

动态膜的通透性可以用过滤时的阻力来衡量.根据 Darcy 公式:

$$R = \frac{TMP}{\mu J} \tag{1}$$

式中, R 为过滤阻力(m^{-1}), TMP 为动态膜两侧的压差(Pa), μ 为水的动力学粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$), J 为通量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

分析动态膜的过滤阻力应该由滤饼的阻力、凝胶层的阻力以及动态膜基的阻力构成,即:

$$R = R_c + R_g + R_s \tag{2}$$

式中,下标 c, g, s 分别表示滤饼层、凝胶层和动态膜基.

在 DMBR 中, TMP 是由出水水头差 H 产生的.图 6 是未使用过的动态膜膜片以及使用中的动态膜膜片的清水通量(J)-出水水头(H)关系图,其中有 2 个现象值得关注.① J - H 的关系并不表现为线性,在图 6 中有向偏向 H 轴的趋势,即虽出水水头差增加,通量的增加趋缓.②在相

同的出水水头下,已经形成凝胶层的膜片清水通量大于未使用过的新膜片的清水通量。

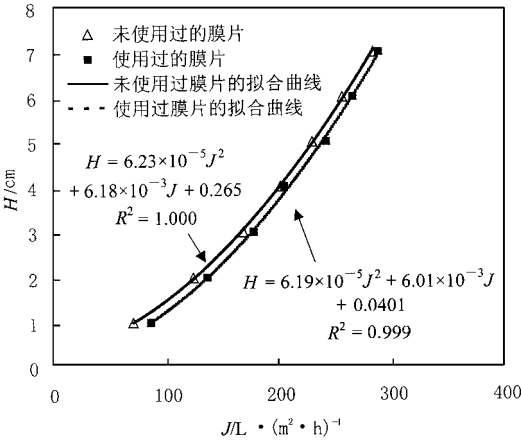


图 6 使用过和未使用过膜片的清水透过性实验和拟合结果

Fig.6 Experimental and simulated H - J profiles of the used and the untapped bio dynamic membrane module

分析表明,产生上述第一个现象的原因在于动态膜的过滤阻力很小,使得透过动态膜的水在出水管路中的流动阻力变得不可忽略.总的出水水头应该是水透过动态膜时的水头损失.流动过程中的水头损失以及最终出水的运动水头之和,即:

$$H = H_m + H_f + H_l + \frac{v^2}{2g} \tag{3}$$

$$H_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \tag{4}$$

$$H_l = \xi \frac{v^2}{2g} \tag{5}$$

式(3)~(5)中, H 为总出水水位差 (m), H_m 为水透过过滤面时产生的水头损失 (m), H_f 为透过过滤面的水在出水管路中的流动水头损失 (m), H_l 为透过过滤面的水在出水管路中的局部水头损失 (m), v 为出水管内的流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), λ 为沿程阻力系数, ξ 为局部阻力系数, l 、 d 分别为出水管的长度和直径 (m)。

根据式(4)和式(5),式(3)右边后 3 项可以合并表示为:

$$H_p = \kappa \frac{v^2}{2g} \tag{6}$$

式中, κ 为出水管路中的总水头损失系数。

$$\kappa = \lambda \frac{l}{d} + \xi + 1 \tag{7}$$

在本研究中可以近似认为 κ 为常数.出水管中的水流速度与膜通量有关:

$$v = \frac{4AJ}{\pi d^2} \tag{8}$$

式中, A 为膜的过滤面积 (m)。

动态膜两侧的压差 TMP 与 H_m 关系如下:

$$TMP = \rho g H_m \tag{9}$$

式中, ρ 为水的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

由以上各式可得:

$$H = \frac{\mu R}{\rho g} J + \frac{8A^2 \kappa}{\pi^2 d^4 g} J^2 \tag{10}$$

式(10)表明, H - J 表现为二次函数的关系.应用二次函数对清水实验的数据点进行了拟合,拟合结果也表示在图 6 中.从图 6 可以看出,拟合的曲线与实验数据非常吻合.图中 H 的单位为 cm , J 的单位按照习惯取为 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.根据拟合曲线可以读出(7)式中一次项和二次项的系数,从而可以求得未使用过的动态膜片的清水透过阻力:

$$R_{n,w} = 1.94 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$$

和连续过滤 24h 后动态膜片的清水阻力:

$$R_{u,w} = 1.84 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$$

可以看出,二者几乎相等.下标 n 、 u 、 w 分别表示未使用的新膜片、使用过的膜片、清水.还可求得透过膜的水在流动过程中的水头损失系数 $\kappa = 2.36 \sim 2.37$,与实际情况也相当吻合。

之所以有生物质覆盖层的膜片的清水透过阻力反而比未使用过的新膜片更小,可能是由于使用过与未使用过的基材表面存在疏水性的差异.本研究中动态膜的基材为涤纶网,即聚酯材料网,将新膜片浸没在水中一段时间后,可以发现基网上附着了很多细小的气泡,说明这种材料的新鲜表面具有一定的疏水性.水从网孔中通过时,网丝表面的疏水性对于网丝附近水的流动产生额外阻力.而使用过的基网,由于有

大量微生物产物的吸附或粘附,表面变得更亲水,因此清水透过的阻力反而更小。

观察图 6 中应用二次曲线拟合的 H - J 函数关系,其中新膜在 H 轴的截距为 0.265cm ,即清水透过新膜片须克服相当于 0.265cm 水头的初始阻力。大量的实验表明,所有新膜片都存在 $0.2 \sim 0.3\text{cm}$ 水头的初始阻力。根据二次曲线拟合的结果计算,本试验中使用过的膜片的初始阻力仅为 0.04cm 水头,考虑到实验中的误差,可以认为使用中的膜片的初始阻力微不足道,即 H - J 关系曲线近似通过原点。

图 6 还表明,新膜和使用中膜片的 H - J 关系曲线相当平行,在扣除了初始阻力后,二者几乎重合,这说明使用中的动态膜的凝胶层对过滤阻力几乎没有贡献,或者是因为生物质对基网表面的改性作用与其产生的过滤阻力有相互抵消的可能。对此,有待更充分的证据加以证实。

在本试验中,使用中的膜片从反应器中取出之前该膜片的通量为 $14.9\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,总出水水头差为 5.9mm 。根据图 6 所示的二次曲线拟合结果,计算运行中动态膜的 $H_m = 5.4\text{mm}$ 。近似认为动态膜出水的粘度与清水粘度相同。反应器中的温度为 26°C ,计算运行中动态膜的总过滤阻力为 $R_u = 1.56 \times 10^{10} \text{m}^{-1}$,可以认为:

$$R_u = R_c + (R_{g,w} + R_{s,w}) \quad (11)$$

式(11)右边括号中项即为使用中动态膜的清水阻力 $R_{u,w}$ 。因此,正常运行中滤饼的过滤阻力为 $R_c = 1.37 \times 10^{10} \text{m}^{-1}$ 。可见,总过滤阻力绝大部分由滤饼的过滤阻力贡献。计算结果还表明,运行中动态膜的总过滤阻力要比传统 MBR 中的膜过滤阻力小 $2 \sim 3$ 个数量级。

2.4 讨论

到目前为止还难以对生物动态膜进行明确的定义。关键的问题在于尚不清楚凝胶层和滤饼层在动态膜过滤中各有什么作用。观察正常运行中动态膜片的表面,虽然可以明确区分有凝胶层和滤饼层存在,但在二者之间难以画出一条明确的界线。

凝胶层的存在是动态膜过滤的关键。考虑

到滤饼本身结构的疏松性,以及在膜面错流作用下的可移动性,动态膜对小分子的截留作用理应属于凝胶层。关于这一点图 4 和图 5 可提供部分证据。凝胶层在传统 MBR 的膜表面都会出现,是由胶体大小的分子在膜的表面附着而成^[3]。这些物质主要源自于微生物产物,包括溶解性微生物产物(SMP)和胞外多聚物(ECP)。SMP 通常被认为可以用上清液 TOC 的含量来表示,主要是腐植酸和富里酸、多糖、蛋白质、核酸等物质,其中不乏大分子有机物和胶体颗粒^[4]。因为 SMP 易于与膜发生作用,对膜有很强的污染能力^[5]。ECP 主要由蛋白质和多糖组成,是污泥絮团的主要成分并使微生物成团,但另一方面也是传统膜表面的主要污染物^[6]。在进行传统 MBR 的研究中,一些研究者也注意到膜表面的凝胶层一方面增加了过滤阻力,另一方面也提高了膜的截留能力^[7]。笔者在反应器运行中也发现,当混合液上清液中的 TOC 小于 10mg/L 时,反冲后动态膜迟迟不能出清水,这种情况下膜片表面的滤饼层与过滤效果良好时相比没有明显的差别,但凝胶层明显少很多。

动态膜片表面的凝胶层还附着了很多细菌,主要是丝状菌、球菌、杆菌等,既可以看到有活体存在,也可以看到有一些死亡的菌体。同时可以看到除了在凝胶层的表面附着有细菌外,一些细菌或细菌的尸体也可能被包裹于凝胶层中或者附着在凝胶层的下面。笔者推测微生物(丝状菌等)对凝胶层在基网上的形成有促进作用,同时还增强了凝胶层的强度。本研究中基网的孔径为 $100\mu\text{m}$,相对于分子或胶体的大小而言是非常大的,如果没有微生物的存在,凝胶层的形成也许比较困难,并且强度也有限。事实上,在反应器运行中就发现,即使是持续数天时间没有反冲的动态膜,如果出水水头差增加过快(1h 内增加约 $5 \sim 6\text{cm}$),出水通量会在某个出水水头差时突然增大,但出水非常混浊,意味着凝胶层在压力较大时有破裂的可能。因此,应将附着的细菌看作凝胶层的组成部分。

滤饼层的作用可能有 2 方面。一方面滤饼太厚会增加过滤的阻力,前面的计算已经表明

动态膜过滤的阻力主要是滤饼过滤的阻力. 另一方面, 滤饼层对较大颗粒有初滤的作用, 将绝大部分颗粒物挡在滤饼层之外, 使凝胶层无须直接面对较大颗粒的冲击, 对凝胶层有保护作用. 在反应器正常运行时, 如果轻轻扰动滤饼层, 会使瞬间的出水变混浊. 从这个意义上讲, 动态膜应该包括滤饼层.

3 结论

初步的研究表明, 微网动态膜表面的生物质层可以区分为滤饼层和凝胶层. 滤饼层主要由污泥絮团组成, 结构疏松, 与底层的结合强度很弱. 凝胶层与动态膜基的结合比较强. 生物动态膜对微小颗粒甚至溶解性的小分子的截留作用主要由凝胶层产生.

由于凝胶层的存在, 运行中的生物动态膜对各个分子量级别的溶解性有机物都有 30% ~ 60% 的截留率. 但是动态膜的分离精度不是很理想, 不能完全截留相对分子质量大于 10^5 的大分子有机物.

已经覆盖有凝胶层的膜片与未使用过的新膜片的过滤阻力几乎相等, 约为 $1.9 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$. 如此小的过滤阻力使得在进行研究时不能忽略滤液在出水管路中的流动水头损失. 使用中的动态膜的过滤阻力主要是滤饼层产生的阻力,

后者占前者的绝大部分.

未使用过的新膜片在清水通过时有明显的初始阻力, 而使用过的膜片的初始过滤阻力则可以忽略. 分析产生初始过滤阻力的原因在于未使用过的膜基材有比较大的疏水性, 吸附的凝胶层对膜基材有改性的作用.

参考文献:

- 1 范彬, 黄霞, 文湘华, 于妍. 动态膜生物反应器处理生活污水的研究. 环境科学, 2002, 23(6): 51 ~ 56.
- 2 国家环保局. 水和废水监测分析方法, 第三版. 北京: 环境科学出版社, 1989. 366 ~ 368.
- 3 Bouhabila El H, Aim R G, Buisson H. Fouling characterization in membrane bioreactors. Sep. Purif. Technol., 2001, 22 ~ 23: 123 ~ 132.
- 4 Barker D J, Stucky D C. A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems. Wat. Res., 1999, 33(14): 3063 ~ 3082.
- 5 Wisniewski C, Grasmick A. Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling. Colloid. Surf., 1998, 138: 403 ~ 411.
- 6 Nagoka H, Ueda S, Miya A. Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process. Wat. Sci. Technol., 1996, 34(9): 165 ~ 172.
- 7 Lee J, Ahn W-J, Lee C-H. Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor. Wat. Res., 2001, 35(10): 2435 ~ 2445.