

膜堵塞机理研究与膜阻力测定*

封莉 张立秋 马放 王宝贞

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150001)

77 B

摘要 对膜污染堵塞机理进行了深入的研究,提出了膜内部的生物堵塞机理,指出膜表面的浓差极化、膜表面与膜孔内的污染、膜内部的生物堵塞是造成膜通量下降的主要原因。同时对膜阻力进行了测定,得出实验所用超滤膜组件的自身阻力 R_m 为 $5.44 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$,膜污染产生的总阻力 R_g 为 $19.88 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$, R_g 约是 R_m 的 3.6 倍,是导致膜通量下降的主要因素。

关键词 膜生物反应器 膜堵塞机理 生物堵塞 膜阻力

1 引言

膜生物反应器(Membrane Bioreactor, MBR)作为一种新型的污水处理工艺,具有诸多突出的优点。特别是近年来,因膜生物反应器用于生活污水的处理,可以获得优良的出水水质,能够满足生活杂用水水质标准,而备受关注^[1],该工艺对于缓解目前我国水资源缺乏的问题具有十分重要的实际意义。但是,膜生物反应器在运行过程中,膜组件的污染堵塞问题没有得到很好的解决,从而限制了该工艺在实际工程中的推广应用。研究膜污染堵塞机理,确定膜阻力的大小,是目前膜生物反应器工艺需要研究解决的关键问题之一^[2-3]。

2 膜堵塞机理研究

膜生物反应器运行一段时间以后,膜组件会被污染物堵塞,造成膜通量下降较多,甚至不再出水。以往研究^[4-7]认为,膜污染堵塞的主要原因有:膜表面的浓差极化、污染物在膜表面和膜孔内吸附沉积造成的污染。

在生物反应器内,混合液在压力驱动下,经过膜组件的过滤截留,溶质在膜表面被截留积聚,浓度升高,远高于反应器内溶质浓度,从而造成溶质的反向扩散,增加了水流通过膜的阻力,降低了膜通量,这个过程称为浓差极化,如图1所示。图中 C_m 为膜表面溶质浓度, C_b 为反应器内溶质浓度, D 为扩散系数, C_p 为透过膜组件一侧溶质浓度, J_c 为溶质流向膜的通量, J_v 为通过膜组件的溶质通量。

膜污染是指生物反应器内混合液中的悬浮颗粒、胶体粒子或溶解性大分子有机物在膜表面和膜孔内

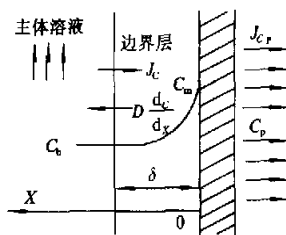


图1 膜表面溶质浓度分布示意图

吸附沉积,造成膜孔径减小或堵塞,使膜通量下降的现象。膜污染根据发生的位置可以分成2种类型:一种是外部堵塞,即污染物吸附沉积在膜的表面,增加了水流过膜的阻力;另一种是内部堵塞,即污染物在膜孔内吸附沉积,减小了膜孔径,从而降低了膜的通量。通过图2所示的电镜照片,可以清楚地看到膜表面与膜孔内的污染情况。

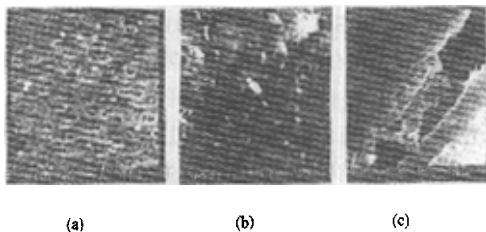


图2 膜组件污染前后对比

图2中(a)所示为新膜(中空纤维超滤膜,聚丙烯材料,膜孔径 $0.1 \mu\text{m}$)表面的电镜照片,可以清楚地看到膜表面的网状骨架和均匀分布的膜孔。此时,膜未受到污染,具有较高的通量。(b)所示为膜组件运行一段时间,已被污染堵塞后膜表面的电镜照片,从照片中已经看不到膜孔的存在,膜表面粘附的污泥形成了生物膜,并可观察到生物膜上附着生长的短杆

* 哈尔滨工业大学校基金资助项目(HIT.2000.27)

菌。此时,膜阻力已较大,膜通量大幅度降低,膜组件需要进行清洗。(c)所示为膜组件污染后,膜孔断面的电镜照片,可以清晰地看到在膜孔内吸附沉积的污染物,使得膜孔径减小,降低了过水断面,水流阻力增加。

在利用膜生物反应器处理生活污水的实验过程中,对运行一段时间后的膜纤维内腔作电镜照片发现,膜内壁上布满了一层厚实的生物膜,如图3所示。随着运行时间的延长,生物膜的厚度在不断增加,过水断面逐渐减小,水流阻力增加。由此提出,膜纤维内腔的生物堵塞也是造成膜污染、影响膜通量的一个重要原因。

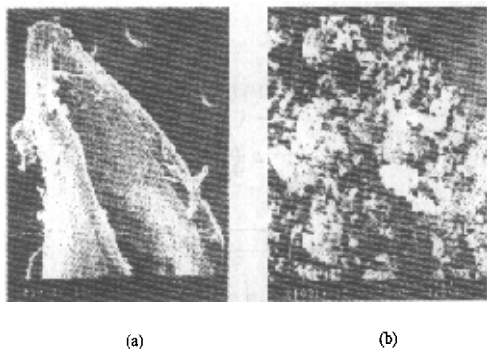


图3 膜内腔电镜照片

图3中(a)所示为放大250倍的膜纤维斜腔电镜照片,可以看到内壁上覆盖了一层密实的生物膜。(b)所示为放大10 000倍的膜内壁电镜照片,生物膜表面吸附生长着大量的细菌,主要为球菌和短杆菌。

膜纤维内壁上形成生物膜的原因是纤维内壁表面粗糙不平,如图4所示,这就为细菌的附着生长提供了条件。随着在内壁上的细菌不断分泌粘性物质,吸附利用出水中剩余的营养有机物质,进行生长繁殖,使得生物膜逐渐增厚,减小了过水断面,从而影响了膜通量。可以认为:膜表面的浓差极化、污染物

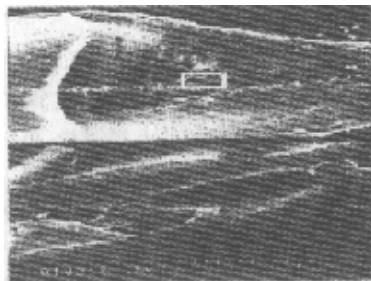


图4 新膜内壁电镜照片

在膜表面与膜孔内形成的污染、膜纤维内腔的生物堵塞是造成膜通量下降的3个主要原因。

3 膜阻力的测定

根据 Darcy 定律过滤模型,膜通量可用下式表示:

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_z)} \quad (1)$$

式中 J_v ——膜通量 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

ΔP ——膜两侧的压力差 Pa;

μ ——溶液的粘度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

R_m ——膜组件本身的阻力 m^{-1} ;

R_z ——膜污染产生的总阻力,包括浓差极化、膜表面和膜孔内污染、内腔的生物堵塞等产生的阻力 m^{-1} 。

(1)式表明,在温度一定,即溶液粘度 μ 为定值的条件下,膜通量 J_v 与膜两侧的压力差 ΔP 成正比,与膜总阻力 $(R_m + R_z)$ 成反比。为了求得 R_m 与 R_z 的大小,组装了如图5所示的一体式膜生物反应器实验装置,膜组件置于反应器之中,生活污水贮存在高位水箱中,通过平衡水箱向反应器内进水。膜组件的出水由水射器引水后,依靠反应器液面与出水管的位置高差自流水,改变出水管的高度,相当于改变了膜两侧的压力差 ΔP ,即可调整膜通量。

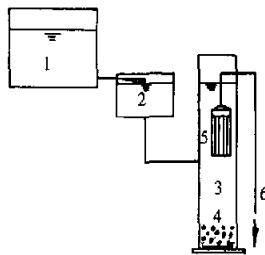


图5 实验装置示意图

1—高位水箱;2—平衡水箱;3—生物反应器;4—曝气装置;5—膜组件;6—出水管。

装置安装完成后,首先在温度为 24°C 的清水中对新膜进行了实验,考察了新膜在不同压力差 ΔP 条件下,膜通量的变化情况,此时,可认为膜污染产生的总阻力 R_z 为0,实验结果如图6所示。

在温度为 24°C 时, $\mu_w = 9.186 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,为一常数,膜组件自身的阻力 R_m 也为一常数,根据(1)式知,膜通量 J_v 与压力差 ΔP 呈线性相关。将图6中各点进行线性回归,得到如下形式方程:

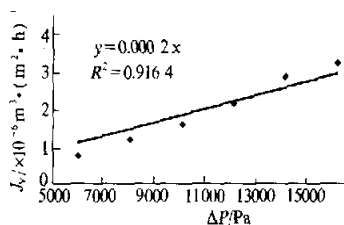


图6 清水时新膜 J_v 随 ΔP 变化

$$J_v = 2 \times 10^{-10} \Delta P \quad (2)$$

方程斜率 $1/(\mu \cdot R_m) = 2 \times 10^{-10}$, 将 $\mu = 9.186 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 代入, 即可求得膜自身的阻力 R_m 为 $5.44 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 。

为了进一步求得膜污染产生的总阻力 R_z , 利用上面的装置来进行处理生活污水的实验。首先在生物反应器内接种活性污泥, 然后连续进出水, 进行污泥的培养驯化。当反应器内的污泥培养成熟之后(此时反应器内的污泥浓度 SS 为 3 600 mg/L), 将前述清水实验所用的新膜放入反应器中, 连续运行。发现膜组件连续工作 15 d 后, 便受到了较为严重的污染, 膜通量下降近 80%。此时, 仍在水温 24 °C 条件下, 改变膜两侧的压力差 ΔP , 测定膜通量的变化情况, 结果如图 7 所示。

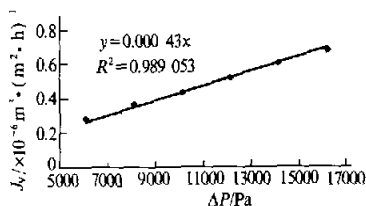


图7 膜污染后 J_v 随 ΔP 变化

同样, 利用线性回归的方法, 得到如下方程:

$$J_v = 4.3 \times 10^{-11} \Delta P \quad (3)$$

方程斜率 $1/[\mu(R_m + R_z)] = 4.3 \times 10^{-11}$, 将 $\mu = 9.186 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 代入, 得膜的总阻力 ($R_m + R_z$) 为

$25.32 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$, 从而得出由于膜污染产生的总阻力 R_z 为 $19.88 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 。对比膜自身的阻力 R_m 与膜污染总阻力 R_z 得出, R_z 是 R_m 的 3.6 倍, 是影响膜通量的主要因素。

4 结论

(1) 本研究对膜污染堵塞机理进行了深入的研究与探讨, 提出了膜内腔生物堵塞的机理, 得出膜表面的浓差极化、膜表面与膜孔内的污染、膜内部的生物堵塞是造成膜通量下降的主要原因。

(2) 对膜组件自身的阻力 R_m 与膜污染后的总阻力 R_z 进行了测定, 得出本实验所用超滤膜组件的自身阻力 R_m 为 $5.44 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$, 膜污染产生的总阻力 R_z 为 $19.88 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$, R_z 是 R_m 的 3.6 倍, 是导致膜通量下降的主要原因。

参考文献

- 1 Ahn K H. et al. Application of tubular ceramic membranes for reuse of wastewater from buildings. *Water Science & Technology*, 1998, 38(4/5): 373 ~ 382.
- 2 Katsuki Kimura et al. Filtration resistance and efficient cleaning methods of the membrane with fixed nitrifiers. *Water Research*, 2000, 34(11): 2895 ~ 2904.
- 3 Nagaoka H. et al. Fouling process in membrane separation activated sludge system. 5th symposium on pollution and purification of environmental waters, Gumma, 1998, May: 21 ~ 22.
- 4 刘忠洲等. 微滤、超滤过程中的膜污染与清洗. *水处理技术*, 1997, 23(4): 187 ~ 193.
- 5 续曙光等. 超滤膜污染和清洗方法的研究. *环境化学*, 1998, 17(4): 404 ~ 406.
- 6 樊耀波等. 膜生物反应器中膜的最佳反冲洗周期. *环境科学学报*, 1997, 17(4): 339 ~ 444.
- 7 James Engler and Mark R. Wiesner. Particle fouling of a rotating membrane disk. *Water Research*, 2000, 34(2): 557 ~ 565.

第一作者 封莉, 女, 1972 年出生。哈尔滨工业大学市政工程专业在读博士研究生, 讲师, 主要从事水污染控制及固体废弃物处理。

2001-11-20 收稿



“微网复合吸声板”科技成果通过鉴定

2001 年 10 月深圳市国志汇富高分子材料股份有限公司研制的“微网复合吸声板”通过了技术鉴定, 专家学者一致认为, 微网复合吸声板是一种新型的定型化吸声材料。它采用改性的合成高分子材料技术, 制成阻燃、耐老化、吸声性能优良的微网材料, 再将其经过表面无机胶凝材料处理, 形成有机和无机 2 种材料复合的新型吸声板。它具有吸声系数高、耐水、阻燃性 A 级、成型加工和装饰性能优良, 无二次污染等优点。属无纤维、环保型新材料。可广泛应用于高速公路、轻轨、铁路、机场、高架道路等交通噪声声屏障; 地铁、隧道等地下建筑吸声; 体育场馆、影剧院、演播厅、录音室、娱乐场所等装饰吸声以及工业厂房、站房的吸声降噪, 具有广阔的市场前景。该种新型吸声材料已在苏州高达电厂冷却塔声屏障、峨眉山温泉开发建设公司高档会议室等工程中应用, 效果优良。

(吕玉恒)