

出水水头对自生生物动态膜过滤性能的影响

范彬^{1, 2}, 黄霞², 栾兆坤¹ ((1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084))

摘要: 增加出水水头不利于自生生物动态膜(SFDM)的恢复. 随着恢复期出水水头的增加, SFDM的稳定出水通量逐渐达到一个极限通量, 约为 $35 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 继续增大出水水头, 稳定出水通量甚至有降低的趋势. 在相同的出水通量下, 动态膜的稳定运行时间随着恢复期出水水头的增加而显著降低. 当恢复期出水水头为 0.5 cm 时, 稳定运行的时间 $> 10 \text{ d}$, 当恢复期出水水头为 10 cm 时, 稳定运行时间 $< 5 \text{ h}$. 研究了产生上述现象的原因, 并提出使每个过滤周期从出水水头为 0 处开始的操作策略.

关键词: 自生生物动态膜; 出水水头; 过滤性能; 膜生物反应器

中图分类号: TQ028.8 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)05-05-0065

Effects of the Water Head Drop on Performance of the Self-Forming Bio-Dynamic Membrane

Fan Bin^{1, 2}, Huang Xia², Luan Zhaokun¹ (1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. State Key Joint laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To raise the water head drop (WHD) is unbeneficial to the recovery of the self-forming bio-dynamic membrane (SFDM). With the rising of the WHD, the stable flux of the SFDM gradually rised to the maximum, about $35 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, but it had a trend to decline if the WHD was further raised. The duration of the stable stage of the SFDM declined remarkably with the WHD being increased in the recovery stage. The duration of the stable stage was more than 10 d when the WHD was 0.5 cm in the recovery stage, but it was less than 5 h when the WHD was 10 cm . The causes of these phenomena were analyzed. It was proposed that each running cycle of the SFDM be started at the WHD of zero.

Keywords: self-forming bio-dynamic membrane; water head drop; filtration performance; membrane bioreactor

自生生物动态膜(self-forming bio-dynamic membrane, SFDM)以大孔过滤材料(如普通筛网)为载体,利用其上生成的生物质层的截留作用实现膜过滤的功能.应用这一原理建立的自生动态膜-生物反应器(SFDMBR)污水处理工艺,在保留膜-生物反应器工艺优点的同时,可以大幅降低过滤组件的造价,同时还具有出水水质优良、小水头自流出水(出水水头 $< 5 \text{ cm}$)、通量大、污染控制和清除简易等突出优点^[1, 2].

SFDM与MBR中固定膜的污染层有相似性.对于传统的固定膜而言,膜两侧的压差(trans-membrane pressure, TMP)及其变化的历程对膜污染层的结构以及膜污染的发展都有影响. SFDM过滤动力为水力自重,如果忽略水流

在动态膜出水管路上的水头损失^[2],可以近似认为SFDM的TMP等于反应器出水口与反应器内的液位差(本文称为出水水头, water head drop, WHD).本文的主要目的是研究WHD对SFDM性能的影响.

1 材料和方法

图1是SFDMBR和SFDM的结构示意图,详细介绍以及反应器的运行方式请见文献[1].

试验中研究了动态膜恢复期的WHD对动态膜运行的影响.分别研究了恢复期WHD = 10 cm , 8 cm , 6 cm , 4 cm , 2 cm , 0.5 cm 的情形.

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: 2002-09-27; 修订日期: 2002-11-21

WHD = 0.5cm 是从反应器日常运行中观察得到.在反应器日常运行中,当一个新的运行周期开始后,WHD 略高于 0 时产生出水.随后在恢复期的初期 WHD 有小幅上升,并逐渐达到一个稳定值.当出水通量为 $14.9\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时,恢复期内的 WHD 平均约为 0.5cm.其它 WHD 通过以下方法获得:①将反应器的液位提升到 WHD=10cm 处,停止进水和所有出水,保持侧向曝气;②将膜组件中间相邻的 2 块膜片取出,浸没在清水中,轻轻抖动膜片,直到其上可见的滤饼层完全脱落,然后将膜片重新安装,打开这 2 块膜片的出水口;③测量出水通量,并使出水返回反应器以保持 WHD 恒定;④一次实验结束后,通过取出部分混合液的方式将反应器的 WHD 下调 2cm;⑤重复 ①~④,依次进行 WHD = 10cm,8cm,6cm,4cm,2cm 的实验.试验中,因出水返回反应器滞后导致 WHD 的最大误差为 -0.2cm,即 WHD 在 $(\text{WHD} - 0.2\text{cm}) \sim \text{WHD}$ 之间波动,仍近似认为 WHD.所有的实验安排在一天内进行,因此可以认为与混合液特性有关的其它参数不会发生显著变化.

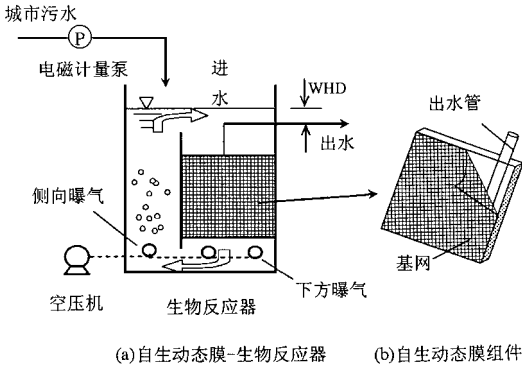


图 1 自生动态膜-生物反应器及动态膜组件结构示意图
Fig.1 Sketches of SFDMBR (a) and SFDM module(b)

反应器的进水来源于清华大学校区内的污水泵站,此污水由学生宿舍和部分家属区的生活污水、校内餐饮业废水、办公楼和实验室废水等组成,属于典型的城市污水.试验期间污水的主要组成: COD 浓度 $150 \sim 400\text{ mg/L}$ (平均 188 mg/L), $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度为 $30 \sim 60\text{ mg/L}$ (平均 39 mg/L), $\text{pH} = 6.7 \sim 7.5$ (平均 7.2).反应器

的水力停留时间为 3.5h,污泥停留时间为 47d.试验期间反应器内的污泥浓度为 $4000 \sim 5000\text{ mg/L}$ (平均 4500 mg/L),混合液温度平均为 27°C .侧向曝气强度为 $18\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$.

试验中还研究了动态膜稳定出水期间改变动态膜的出水水位对动态膜通量的影响.在通量为 $14.9\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 下连续出水 24h 后,仅保持中间 2 个相邻膜片的出水,而将其它所有膜片的出水口关闭,同时使反应器的总进水负荷为 10 L/h [单位反应器横截面积的进水负荷约为 $40\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$].记录随液位上升动态膜的出水通量的变化情况.当动态膜的通量不再随 WHD 的上升而增加时,停止反应器的进水,但保持试验膜片的出水,记录随 WHD 的下降动态膜通量的变化情况.

试验中对出水的浊度进行了测量,所用的仪器为 Hatch 2100 N IS Turbiditymeter.所有的数据取相邻 2 膜片的平均值,相邻 2 膜片的相对误差小于 10%.

2 结果和讨论

2.1 恢复期 WHD 对 SFDM 截留性能的影响

恢复期 WHD 对动态膜出水浊度的影响如图 2 所示.从图 2 可以看到,在动态膜的恢复期,随 WHD 的增加,动态膜的出水浊度增加.这意味着增加 WHD, SFDM 对微细颗粒的截留性能变差.

对微细颗粒的截留性能是 SFDM 最重要的性质.根据研究, SFDM 对微细颗粒的截留性能主要由凝胶层提供. SFDM 的凝胶层是紧密覆盖在膜基上的一层凝胶状物质,主要由蛋白质和多糖等物质组成.凝胶层具有类似于微滤膜甚至超滤膜的微孔结构,从而使 SFDM 具有高效的截留作用,可以从出水中去除几乎所有的悬浮颗粒以及部分溶解性物质^[3].经过下方曝气后,凝胶层受到一定程度的破坏.当新的周期开始后,一些凝胶性的物质在膜基上沉积,从而使 SFDM 对微细颗粒的截留性能逐步恢复.随 WHD 的增加,动态膜恢复期初始阶段的通量显著增大,这对凝胶层的恢复产生不利影响.一方面,增加通量不利于微细颗粒的沉积^[4,5],而构

成凝胶层物质的粒度主要在胶体粒度的范围内.另一方面,凝胶层的结构比较脆弱,增加通量对已形成的凝胶层结构的破坏作用增大.因此,随着恢复期 WHD 的增加,SFDM 对微细颗粒的截留性能变差.

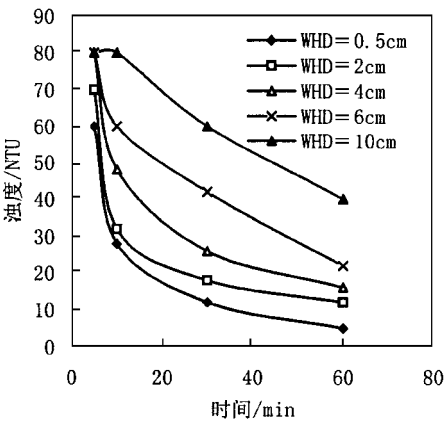


图 2 恢复期出水水头对出水浊度的影响
Fig.2 Effects of the head drops on the effluent turbidity in the recovery stages

2.2 WHD 对动态膜通透性和稳定性的影响

在不同 WHD 下,动态膜恢复期内的出水通量随时间的变化情况如图 3 所示.在恢复阶段,SFDM 的通量先是迅速下降,然后逐渐达到一个稳定值.图 3 显示,随 WHD 的增加 SFDM 的初始通量增大,但通量随时间变化的曲线更为陡直.并且,当 WHD 分别为 10cm、6cm、2cm 时,SFDM 的通量分别约在 10 min、20 min 和 30 min 时达到稳定.这表明,增加 WHD,出水通量可以更快地达到稳定.值得注意的是,在 WHD=10cm 时,SFDM 通量的稳定性并不太好,在 10 min 之后仍然有比较明显的下降趋势.

图 4 显示第 60 min 时不同 WHD 下动态膜的通量.可以认为在第 60 min 时,动态膜的通量已经达到稳定.从图 4 中可以看到,动态膜的稳定通量与 WHD 并不呈正比的关系.随着 WHD 增加,稳定通量的上升趋势变缓,并且在 WHD 为 6cm 时达到最大;继续增加 WHD,动态膜的稳定通量不再增加.随着 WHD 增大,膜通量出现最大值的现象,在固定膜的过滤中被称为极限通量(limiting flux)现象^[6].本研究中的极限

通量约为 $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

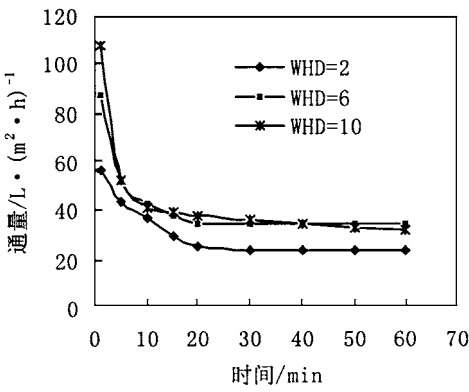


图 3 恢复期通量随时间的变化
Fig.3 Profiles of flux vs.time in the recovery stages

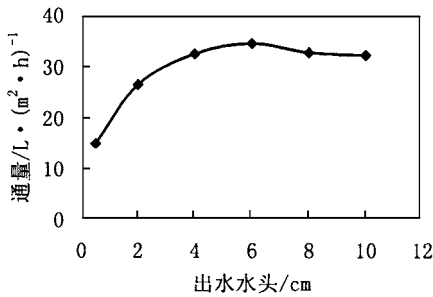


图 4 出水水头对稳定通量的影响
Fig.4 Effects of the water head drop on the stable flux

恢复期间的 WHD 对动态膜稳定运行时间也有明显影响.虽然提高 WHD 可以在一定程度上增加稳定通量,但稳定运行时间显著缩短.图 5 是 WHD=10cm 时,动态膜的通量随时间的变化情况.从图 5 可以看到,在 WHD=10cm 时,动态膜的稳定运行时间仅能维持 2~3h,然后通量迅速下降,在第 5h 时已近似完全停顿,标志着动态膜运行已经进入堵塞期.

为了比较恢复期 WHD 对动态膜稳定运行的影响,从出水的第 60 min 时开始将反应器的运行切换为连续进出水的模式,进水负荷设定为 $14.9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.这里,为了比较的方便,定义稳定运行时间为出水通量下降到 $5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 前持续出水的时间.在此进水负荷下,动态膜的稳定运行时间受恢复期 WHD 的影响(图 6).从图 6 可以看到,在恢复期 WHD=0.5cm 时,动态膜的出水通量可以达到 10d 以上;在恢复期

WHD = 2 cm 时,动态膜的稳定运行时间为 1 d 左右,稳定运行期 WHD 为 1.7 cm;而 WHD = 10 cm 时,动态膜的稳定运行时间小于 5 h,稳定运行期 WHD 大于 9 cm.

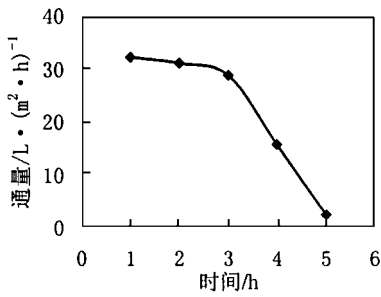


图 5 WHD= 10cm 时通量随时间的变化情况
Fig. 5 Changes of flux with time at WHD=10 cm

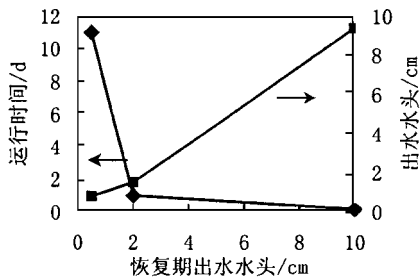


图 6 恢复期出水水头对稳定期运行的影响
Fig. 6 Effects of the head drops of the recovery stages on the performance of the stable stages

分析导致上述诸种现象的原因,在于 SFDM 的结构特点.如果不包括动态膜基, SFDM 由外层的滤饼层和内层的凝胶层构成.滤饼层主要由污泥絮体组成,厚度较大,结构上比较疏松,可以通过轻微的水力扰动清除. SFDM 的过滤阻力主要由滤饼层产生.根据研究,滤饼层的过滤阻力可以占总过滤阻力的 90 % 以上^[2].根据图 3 显示的恢复期的通量-时间曲线可以推测,通量的迅速下降阶段对应于恢复期滤饼层的形成过程.由于这一过程持续的时间比较短,可以认为恢复期滤饼层的厚度与微生物增殖的关系不大,而主要受水动力学因素的控制.

在凝胶层没有恢复之前,过滤面上沉积的颗粒以粗颗粒为主.因此可以用惯性提升力模型来研究恢复期滤饼层的形成过程.根据这一

模型,颗粒的受力如图 7 所示^[4].图 7 中下标 l, f, d, y 分别表示惯性提升力、摩擦力、与膜面错流方向相同的推动力、出水引起的拖拽力和已沉积颗粒受到的粘附力.一体式 MBR 中,膜面错流速度不太大,膜面错流造成的提升力 F_l 和透过膜面的渗透流产生的拖拽力 F_y 是控制过滤面附近悬浮颗粒向膜面沉积的主要因素.在相同的膜面错流下,提高通量使 F_y 增加,导致颗粒向膜面沉积的趋势增加.

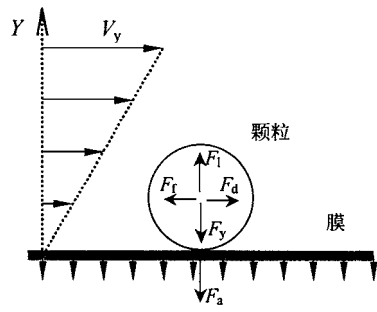


图 7 错流过滤中颗粒的受力分析
Fig. 7 Acting forces on a single particle in crossflow filtration

在恢复期,特别是在恢复期的开始阶段,提高 WHD 使通量增加,因此在相同的错流速度下,滤饼层的厚度增加.相应地,动态膜的过滤阻力也会增加.这是导致随 WHD 增加,动态膜的稳定通量的增幅趋缓并逐渐达到一个最大值的主要原因.另一方面,滤饼层具有可压缩性.随着 WHD 的增加,动态膜的滤饼层趋于紧密,使得滤饼层的比滤阻上升,这是导致在通量达到最大后,继续提高 WHD,稳定通量还略有下降的主要原因.随着时间的延长,滤饼密实程度还会继续发展,并且这种变化具有不可逆性.因此如图 6 所示,即使在第 60 min 后采用相同的进水负荷,随着恢复期 WHD 的增加,稳定运行时间也会缩短.

滤饼层的可压缩性在另外一个试验中表现得更为直观.图 8 是在运行的稳定期先逐渐增加 WHD(上升通道)然后降低 WHD(下降通道)导致通量升高和降低的情况.在上升通道中,动态膜的通量先逐渐增加,并在 WHD = 40 mm 左右时达到最大.进一步提高 WHD,通量几乎不

变.在下降通道中,动态膜的通量随 WHD 的变化比较符合线性关系,但通量明显小于上升通道中相同水头下的通量.这种滞后现象在固定膜过滤中同样存在^[7].说明随 WHD 的增加,SFDM 发生了变化,并且由此导致的过滤阻力的增加是不可逆的.这种不可逆性可能由 2 方面因素导致.一是污泥的絮体颗粒一旦到达过滤面,则会受到指向过滤面的粘附力影响(如图 7 所示的 F_a).如果要使已附着颗粒脱离过滤面重新回到混合液,则必须提供更强大的水力剪切强度以克服这一额外的粘附力.或者说,在热力学的意义上颗粒的沉积过程是一个不可逆的过程.二是 WHD 对滤饼的压缩作用改变了滤饼结构,使滤饼的比滤阻增加.这一变化也是不可逆的.

在图 8 中动态膜的最大通量约为 $42\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,而在图 4 中动态膜的最大通量约为 $35\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,前者高于后者.这一现象表明,动态膜的过滤性能与动态膜形成和发展的历史有关.使 WHD 逐步增加到某一高度时的过滤阻力比从一开始就维持这一 WHD 产生的过滤阻力要小,这与固定膜过滤中的情形相似^[5].

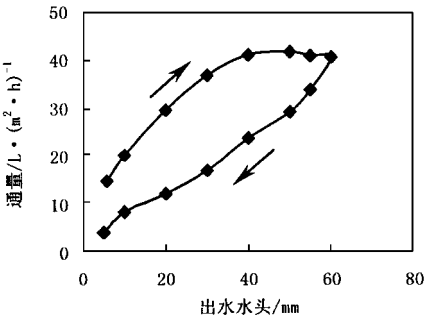


图 8 稳定运行期间出水水头变化对通量的影响
Fig.8 Effects of the changing processes of head drop on the fluxes in stable stages

3 结论

(1) 在恢复期内维持较高的 WHD 不利于动态膜凝胶层的修复,使动态膜的截留性能下降.

(2) SFDM 稳定通量并不随 WHD 的增加而正比地增加,当 WHD 达到一定高度后,稳定通量即达到最大,继续增加 WHD,SFDM 的稳定通量甚至有减小的趋势.

(3) 增加 WHD 显著缩短 SFDM 稳定运行的时间.

(4) 在动态膜操作中应使每个新的运行周期都从 WHD 为 0 处开始.同时应设定一个 WHD 作为过滤周期的终点,因为过高的 WHD 不仅不会提高通量,还会进一步压缩滤饼,使动态膜的通透性恶化.根据长期运行的经验,设置过滤周期的终点 $\text{WHD}=5\text{ cm}$ 是比较合理的.

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 范彬,黄霞,文湘华,于妍.微网动态膜过滤性能的研究.环境科学,2003,24(1):91~97.
- 3 Bin Fan,Xia Huang. Characteristics of Self Forming Dynamic Membrane Coupled with Bioreactor for Municipal Wastewater Treatment. Environ. Sci. Technol.,2002,36:5245.
- 4 Altmann J, Ripperger S. Particle deposition and layer formation at the crossflow microfiltration. J. Mem. Sci.,1997,124:119~128.
- 5 Chen V, Fane A G, Madaeni S, Wenten I G. Particle deposition during membrane filtration of colloids: transition between concentration polarization and cake formation. J. Mem. Sci.,1997,125:109~122.
- 6 Aimar P, Field R W. Limiting flux in membrane separations: a model based on the viscosity dependency of the mass transfer coefficient. Chem. Eng. Sci.,1992,47(3):576~586.
- 7 Gesar Guizoui G, Boyaval E, Daufin G. Critical stability conditions in crossflow microfiltration of skimmed milk: transition to irreversible deposition. J. Mem. Sci.,1999,158:211~222.