

一体式膜-生物反应器的水动力学特性

刘锐, 黄霞, 王志强, 钱易(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, E-mail: xhuang@tsinghua.edu.cn)

摘要: 以研究一体式膜-生物反应器的水动力学特性为目的, 通过试验测定了反应器中膜间液体错流流速的分布和大小, 建立了描述错流流速的计算模型, 并考察了曝气量和反应器结构对错流流速的影响. 曝气量为 $40\text{m}^3/\text{h}$ 时, 膜组件中部的错流流速为 $0.36\sim 0.43\text{m}/\text{s}$, 比膜组件 2 边的流速约大 $6.2\%\sim 21\%$. 错流流速实测值与模型计算值吻合良好. 曝气量为 $20\sim 50\text{m}^3/\text{h}$ 时, 错流流速随曝气量的升高而增大, 当曝气量大于 $50\text{m}^3/\text{h}$ 后错流流速逐渐趋向平稳; 反应器高度越高, 上升流通道越窄、下降流道和底部流道越宽, 在同样曝气量条件下, 可获得越大的错流流速.

关键词: 膜-生物反应器; 错流流速; 曝气量; 反应器结构; 计算模型

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)05-0047-04

Hydraulic Characteristics in a Submerged Membrane Bioreactor

Liu Rui, Huang Xia, Wang Zhiqiang, Qian Yi(ESPC State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: xhuang@tsinghua.edu.cn)

Abstract: In this paper, cross-flow velocity along membrane surface and its distribution at different sites were experimentally measured in order to clarify the hydraulic characteristics in a submerged membrane bioreactor. A simulation model for calculating the cross-flow velocity was then developed. Effects of aeration rate and bioreactor structure on the cross-flow velocity were investigated. The results showed that cross-flow velocity on the middle part of the membrane module was $0.36\sim 0.43\text{m}/\text{s}$ at an aeration rate of $40\text{m}^3/\text{h}$, about 6.2% to 21% higher than that on the sides. The measured cross-flow velocity was fitted well with the result calculated with the simulation model. Cross-flow velocity increased with aeration rate, but gradually approached a constant value when the aeration rate was higher than $50\text{m}^3/\text{h}$. Under the same aeration rate, a higher cross-flow velocity could be achieved in a bioreactor, which has a higher height, narrower up-flow channel, wider down-flow channel and wider bottom passage.

Keywords: membrane bioreactor; cross-flow velocity; aeration rate; bioreactor construction; simulation model

膜-生物反应器是由膜分离组件和生物反应器组合而成的一种新型水处理工艺, 由于其出水水质良好且稳定、结构紧凑、容积负荷高、剩余污泥产量少等优点^[1~3]日益受到人们的重视. 根据膜组件位置的不同膜-生物反应器可分为分置式和一体式 2 类. 分置式动力费用高, 并且由循环泵高速旋转产生的剪切力也有可能使某些微生物菌体失活^[4]. 一体式膜-生物反应器能有效克服分置式的缺点, 另外占地也较分置式更为紧凑.

在一体式膜-生物反应器中, 为减轻污泥在膜表面的沉积, 以延长膜的运行周期, 保持生物反应器内良好的水流循环十分重要. 本研究实测了反应器内膜间水流错流流速的大小, 并考察了错流流速与曝气量的关系; 然后建立了描述错流流速的模型并用试验结果进行了验证.

最后, 利用该模型探讨了反应器设计尺寸对膜-生物反应器中膜间水流错流流速的影响.

1 错流流速的试验测定

1.1 一体式膜-生物反应器试验装置

错流流速测定试验中采用图 1 和图 2 所示的中试装置.

整个系统主要由生物反应池和膜组件 2 部分组成. 生物反应池长 1.4m , 宽 0.9m , 高 1.9m , 容积 2.4m^3 . 中空纤维膜组件共 11 个, 单层设置, 每个膜组件面积 4m^2 , 总面积 44m^2 . 膜材料为聚乙烯, 膜孔径为 $0.1\mu\text{m}$.

生物反应池被隔板分成升流区和降流区.

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目
作者简介: 刘锐(1973-), 女, 博士研究生.
收稿日期: 1999-10-17

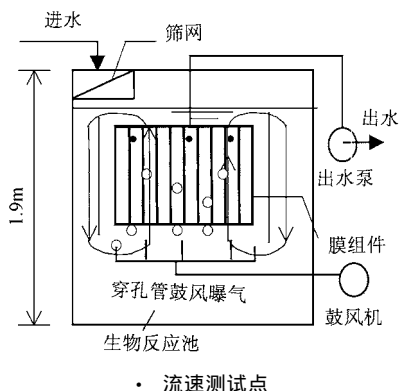


图1 一体式膜-生物反应器中试工艺流程

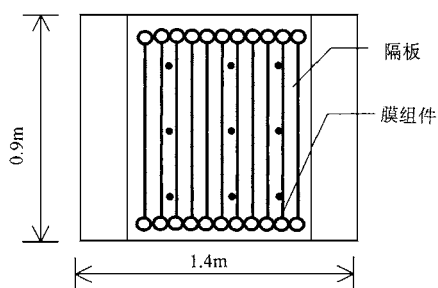


图2 一体式膜-生物反应器中试装置平面图

膜组件装置于升流区, 下设穿孔管曝气以提供水流循环动力和微生物分解有机物所需氧气。

进水采用清华大学北区的生活污水, 经0.9mm不锈钢筛网过滤后进入生物反应池, 其中的污染物经活性污泥中的微生物分解, 处理出水在出水泵的抽吸作用下经膜过滤后获得。

1.2 流速测试布点与测试方法

各流速测试点(图1和图2)均布于反应池上升流区域液面下0.6m的9处。膜间液体上升流速用螺旋桨测速仪测定, 每点测5次, 取平均测定结果。此结果可以近似认为代表膜间液体错流流速。

为考察曝气量对流速的影响, 变化了曝气量。曝气量采用转子流量计测定。在整个流速测定试验期间, 污染浓度为4.1g/L。

1.3 流速测定结果

(1) 装置内各点流速分布 通过流速测定得到曝气量为40m³/h时反应池内各点液体上升流速的分布情况, 如图3所示。从图3可以看出, 沿膜组件横向各测定点的液体上升流速相

差不大, 但沿纵向方向, 在不同位置点上液体上升速度有一定的差异。以膜组件中间为中心, 液体上升流速呈对称分布。处于每块膜组件中间点的液体上升流速为0.36~0.43m/s, 比膜两边的膜面流速约大6.2%~21%。

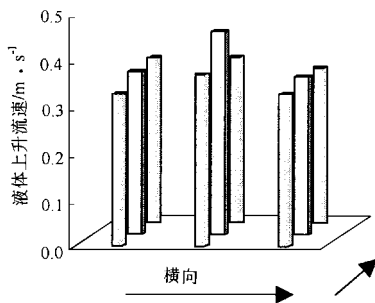


图3 装置内各点流速分布

(2) 曝气量对膜间液体错流流速的影响 将图3中所示9点的液体上升流速平均, 得到膜间液体平均错流流速, 并改变曝气量, 考察了其变化情况, 如图4所示。

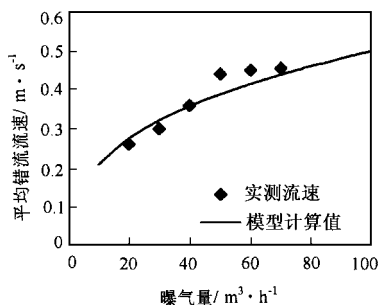


图4 曝气量对膜间液体平均错流流速的影响

可见, 膜间液体平均错流流速随着曝气量的增加相应增大, 并逐渐趋向于平稳。

2 错流流速计算模型

2.1 模型描述

将图2所示的一体式膜-生物反应器从中分成两半, 则每半可看成是一个如图5所示的内循环式气提反应器。这种气提反应器由升流区和降流区组成。在升流区通常设有曝气装置, 降流区则没有, 且同前者相比, 其含气率较低。升流区和降流区液体含气率的差异导致2个区域内流体密度的差异, 从而形成了流体的循环流动。在气提式反应器中, 这个由气体驱动的液

体循环流速是一个重要的设计参数,它控制着诸如气液传质速率、混合性能和紊动特性等一系列反应器的重要参数。

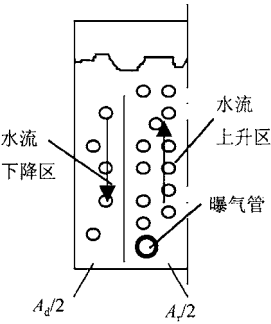


图5 气提式反应器示意图

对于牛顿流体等粘度较小的流体, Yusuf Chisti 和 Murray Moo-Young^[5]利用反应器内能量守恒,给出了气提式反应器中液体上升流速计算公式。该公式也可应用于一体式膜-生物反应器中液体上升流速 u_{Lr} 的计算。

$$u_{Lr} = \left[\frac{2gh_D \cdot (\epsilon_r - \epsilon_d)}{K_B \cdot \left[\frac{A_r}{A_d} \right]^2 \cdot \frac{1}{(1 - \epsilon_d)^2}} \right]^{0.5} \quad (1)$$

式(1)中: u_{Lr} 为液体上升流速(m/s); g 为重力加速度(m^2/s); h_D 为反应器中气液扩散高度(m); A_r 为膜-生物反应器上升流过水总断面积(m^2); A_d 为膜-生物反应器下降流过水总断面积(m^2); ϵ_r, ϵ_d 为上升流和下降流的含气率; K_B 为反应器底部区域的阻力损失系数。

其中曝气后的液面高度 h_D 可用式(2)计算: $h_D = \frac{h_L}{1 - \epsilon}$ (2)

式中: h_L 反应器有效高度(m); ϵ 总含气率。

升流区的含气率 ϵ_r 可用式(3)计算:

$$\epsilon_r = \frac{U_{Gr}}{0.24 + 1.35(U_{Gr} + u_{Lr})^{0.93}} \quad (3)$$

式中: U_{Gr} 为曝气强度($m^3/m^2 \cdot s$), 由式(4)计算:

$$U_{Gr} = \frac{Q_g}{3600 \times A_r} \quad (4)$$

式中 Q_g 为曝气量(m^3/h)。

对于降流区的含气率, 由于通常很小, 可近似认为: $\epsilon_d = 0$ 。 (5)

总含气率 ϵ 由式(6)计算。

$$\epsilon = (\epsilon_r A_r + \epsilon_d A_d) / (A_r + A_d) \quad (6)$$

反应器下部摩擦阻力系数 K_B 可用式(7)计算:

$$K_B = 11.402 \left[\frac{A_d}{2A_b} \right]^{0.789} \quad (7)$$

式中, A_b 为底部过水通道截面积(m^2)。

从以上可以看出, 液体上升流速 u_{Lr} 不仅与反应器设计尺寸如有效高度 h_L 、反应器升流区和降流区过水面积 A_r 和 A_d 有关, 也与反应器中升流区与降流区的含气率即曝气量相关。

2.2 液体上升流速 u_{Lr} 的计算步骤

按照图6所示步骤采用试算法可以计算出液体上升流速 u_{Lr} 。先假设一个 u_{Lr} 值, 根据图示步骤得到一个计算值 u'_{Lr} 。如果计算所得 u'_{Lr} 与假设值 u_{Lr} 相等, 则这个 u_{Lr} 即为所求值。否则, 重新假设 u_{Lr} , 重复上述过程, 直至计算所得 u'_{Lr} 与假设值 u_{Lr} 相等。

2.3 模型计算值与实测值比较

本中试系统反应器结构尺寸参数如下:

$$\begin{aligned} A_r &= 0.49m^2 & A_b &= 0.432m^2 \\ A_d &= 0.54m^2 & h_L &= 1.43m \end{aligned}$$

其中, A_r 为上升流区域面积扣去膜组件和管件

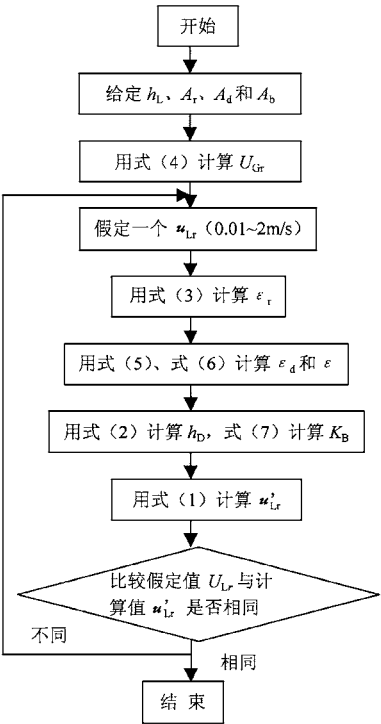


图6 液体上升流速的计算步骤

面积之后实际过水断面积.

利用上述参数采用模型进行计算, 所得到的错流流速如图 4 中的实线所示.

验证了膜组件为双层布置的膜-生物反应器系统, 结果如图 7 所示. 该反应器高 2.3 m, 长 0.9 m, 宽 0.9 m. 由图 7 可见, 在双层布置的膜-生物反应器中, 错流流速的计算结果和实测结果之间吻合情况很好. 在本试验的曝气量范围内, 此模型可用于较准确地描述一体式膜-生物反应器中曝气量与错流流速之间的关系.

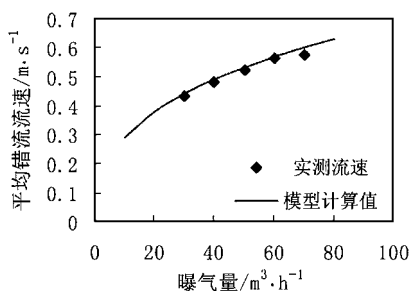


图 7 双层布置膜组件中曝气量与错流流速关系

3 反应器结构对水动力学特性的影响预测

图 8 表示了反应器有效高度 h_L 、反应器升流区与降流区过水断面面积比 A_r/A_d 和反应器底部与降流区过水断面面积比 A_b/A_d 对错流流速的影响.

不难看出, 膜间错流流速除了与曝气强度 Q_g 有关外, 还主要与反应器设计尺寸有关. 反应器高度 h_L 、反应器升流区与降流区过水断面面积比 A_r/A_d 和反应器降流区与底部过水断面面积比 A_d/A_b 等是影响错流流速的重要因素. 在曝气强度一定条件下, 反应器越高、断面面积比 A_r/A_d 和 A_d/A_b 越小, 错流流速越大. 因此, 在反应器设计中应在可能的条件下尽量减小上升流通道, 扩大下降流通道和底部连接通道, 提高反应器高度, 以达到在同样曝气量时获得较大的错流流速之目的.

4 结论

(1) 通过试验可以实测膜间液体错流流速. 沿膜面方向, 膜中间的错流流速较高, 膜两边的

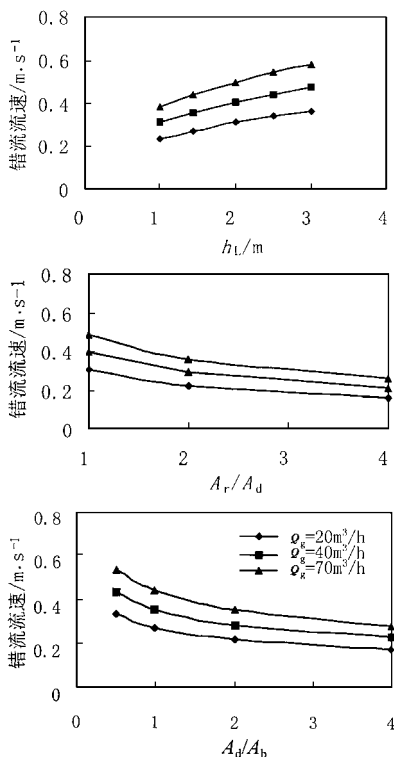


图 8 反应器尺寸对膜间错流流速的影响

错流流速较低且呈对称分布. 错流流速随曝气量的增加而增大, 并有逐渐趋向平稳的趋势.

(2) 用 Yusuf Chisti 和 Murray Moo-Young 气提液体上升流速模型可较准确地描述一体式膜-生物反应器中的膜间液体错流流速.

(3) 运用错流流速计算模型, 考察了反应器结构的影响. 反应器越高、上升流通道越窄、下降流和底部通道越宽, 则越能获得较大的膜间错流流速.

参考文献:

- 黄霞等. 膜生物反应器废水处理工艺的研究进展. 环境科学研究, 1998, 11(1): 40~44.
- 桂平等. 膜-复合式生物反应器组合系统操作条件及稳定运行特性. 环境科学, 1998, 19(2): 35~38.
- 桂平等. 膜-生物反应器运行条件对膜过滤特性的影响. 环境科学, 1999, 20(3): 38~41.
- Martin Brockmann and Carl F Seyfried. Sludge Activity under the Conditions of Crossflow Microfiltration. Wat. Sci. Tech., 1997, 35(10): 173~181.
- Yusuf Chisti and Murray Moo-Young. Improve the Performance of Airlift Reactors. Chemical Engineering Process, 1993, (6): 38~45.