

研究论文

LDV 技术优化膜反应器结构

高 永¹, 胡荣政², 顾 平³

(¹ 江苏技术师范学院化学化工学院, 江苏 常州 213000; ² 江苏工业学院环境与安全工程学院, 江苏 常州, 213000;
³ 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 通过采用激光多普勒测速仪 (LDV) 测定膜反应器内气水混合液的流速分布, 研究了膜反应器中设置导流板、膜出水流速以及曝气强度对膜面的剪切流速的影响。研究表明, 导流板可以增大混合液在中下部膜面附近的切向上升时均流速, 混合液的紊动性增强, 进而增强了对膜面的剪切作用, 有助于延缓膜面滤饼层的形成, 缓解浓差极化现象。增大膜出水流速, 混合液上升流速和指向膜面的流速均有所增大。曝气强度也会影响流速。时均上升流速和脉动上升流速与曝气强度符合正对数关系。增大气量后, 混合液的紊动性增大, 气水混合液对膜面的剪切强度也增大。

关键词: 膜反应器; 膜污染; 流速分布; 剪切力

中图分类号: TQ 028.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 11-2775-06

LDV optimization of structure of membrane reactor

GAO Yong¹, HU Rongzheng², GU Ping³

(¹ School of Chemistry and Chemical Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213000, Jiangsu, China; ² School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213000, Jiangsu, China; ³ School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The flow rate of gas-water mixture in the membrane reactor could be measured with laser Doppler velocimetry (LDV). The impact of deflector, aeration intensity and flow rate of effluent on the shear forces of the membrane surface was investigated. The results showed that the deflector significantly increased the tangential velocity and turbulence of the mixture on the membrane surface. As a result, the shear force on the membrane surface was enhanced and in turn the formation of cake layer was delayed, thus alleviating concentration polarization. The vertical and horizontal velocities increased with increasing effluent flow rate. Also, aeration intensity affected the flow rate of the mixture remarkably. It was found that mean and pulse velocities were positively proportional to aeration intensity in logarithmic relationship, respectively, indicating significant effects of aeration intensity on turbulence and shear forces.

Key words: membrane reactor; membrane fouling; flow rate distribution; shear force

引 言

在膜反应器的膜分离过程中, 膜出水通量会随

着运行时间的延长而减小, 这是膜分离过程中膜性能变化的一种典型行为。它直接影响膜组件的效率和使用寿命, 对整个工艺的经济特性产生关键性的

2009-04-28 收到初稿, 2009-07-23 收到修改稿。

联系人及第一作者: 高永 (1969—), 男, 博士研究生, 副教授。

基金项目: 江苏省教育厅基金项目 (07KJD610047)。

Received date: 2009-04-28.

Corresponding author: Dr. GAO Yong, gaoyong@jstu.edu.cn

Foundation item: supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Education Department (07KJD610047).

影响。造成膜通量衰减的主要原因是浓差极化和膜污染。膜污染的主要影响因素有膜的性质、料液的性质、膜分离操作条件等^[1]。通过改善反应器内的水力学条件,可以增加气水混合液对膜面的剪切力,进而减缓膜面浓差极化和滤饼层的形成^[2-4]。在淹没式膜反应器中,设置导流筒(板)可以增加气水混合液对膜面的剪切力。但导流筒(板)设计参数的优化问题一直没有得到深入的研究,因此有必要通过对膜反应器内混合液流场分布的测试,进一步研究反应器内浓度分布及传质情况。

本文通过采用激光多普勒测速仪(laser Doppler velocimetry, LDV)测定膜反应器内的流速分布状况^[5-6],研究导流板、曝气强度以及膜出水流速对膜面附近主体溶液流速的影响,进而优化膜反应器的结构及运行条件,以减缓膜污染,保持膜通量,延长膜组件的使用寿命。

1 实验材料和方法

1.1 材料

聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维微滤帘式膜组件,天津工业大学膜天膜公司提供,平均膜孔径为 $0.22\ \mu\text{m}$,膜表面积 $1\ \text{m}^2$,新膜的比通量为 $4.21\ \text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{kPa}^{-1}$ 。

1.2 LDV 测定膜反应器流态实验装置

实验用的膜反应器装置如图 1、图 2 所示。反应器水箱材质为 8 mm 厚有机玻璃板,容积为 $0.336\ \text{m}^3$ ($0.500\ \text{m}\times 0.480\ \text{m}\times 1.400\ \text{m}$)。实验以自来水作为原水,出水经循环泵再打入膜反应器。由于受 LDV 仪器测试范围所限,且通常帘式膜组件下部污染比上部严重,故重点研究膜组件中部到下端的混合液湍动情况。

1.3 分析测试仪器

本实验使用丹麦 DANTEC 公司的激光多普勒测速仪测定膜反应器内气水混合液的流速。激光多普勒测速仪的技术参数为:五光束 3 维探头,直径 112 mm,光束直径 4.1 mm,光束间距 37/74 mm,焦距 310 mm;三维位移系统;5 W 水冷氩离子激光器。

1.4 LDV 测速优化膜反应器结构实验

对于淹没式中空纤维微滤膜反应器,无论是膜生物反应器(membrane biochemical reactor, MBR),还是化学混凝微滤膜分离反应器(membrane chemical coagulation reactor, CMR),均采用向反

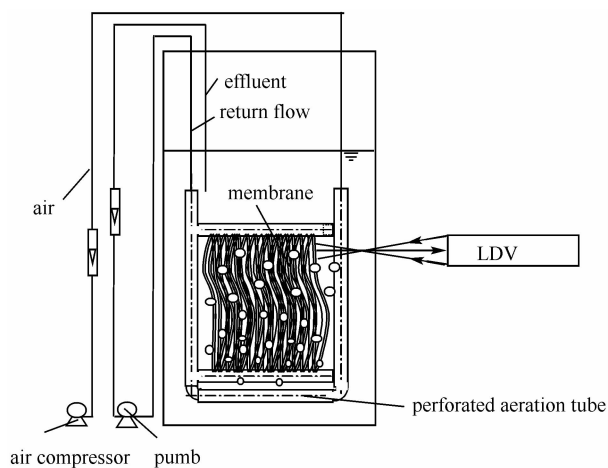


图 1 LDV 测膜反应器流速实验流程

Fig. 1 Schematic diagram of membrane reactor optimization with LDV



图 2 LDV 测速优化膜反应器实验装置

Fig. 2 Apparatus of membrane reactor optimization with LDV

应器内鼓气泡,进而对膜面产生剪切、扰动,以减缓滤饼层的增厚,维持膜通量。同时,MBR 还需通过曝气向反应器内的活性污泥供氧^[7-8]。这样,膜反应器内的混合液就成为由溶液、悬浮固体和空气泡组成的三相流体。在本实验中,采用清水代替反应器内的混合液,并通过穿孔管向反应器内鼓气。在这种情况下,反应器内实际存在的是气液两相流。这样既可以满足 LDV 对介质的光学要求,同时也可以通过测定膜面附近流速随操作条件以及反应器构造的改变而发生的变化情况,来间接反映对膜面的剪切力变化的影响^[9-10]。

湍流的内部结构目前仍不明晰,在流体力学中流点的湍流运动可以理解为两部分组成,一部分是

时均值, 另一部分是它的脉动值^[11]。在本实验中, LDV 输出的时均速度为

$$V = \bar{u} = \sum_{i=0}^{N-1} \eta_i u_i$$

方根脉动速度为

$$v = \sqrt{v^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \eta_i (u_i - \bar{u})^2}$$

式中 \bar{u} 为某一时段 t 内的时均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; N 为 t 时段 LDA 捕获的有效质点数; $\eta_i = 1/N$; u_i 为质点 i 的瞬时流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v 为 t 时段内的方根脉动速度, 方根脉动速度从绝对值上反映了该流点的湍动大小, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

增设导流板的目的是使反应器内的气泡更为密集地分布在膜组件两侧, 进而提高局部的气含率(导流板安装位置如图 3 所示), 同时也可以提高膜组件两侧混合液的上升流速, 增大对膜面剪切力。为了研究增设导流板对膜面剪切力的影响, 通过测定膜面附近混合液流速的变化来反映对膜面的剪切效果。由于向反应器内不断鼓气, 反应器内混合液处于湍流状态, 因而各位置的瞬时流速在随时变化。瞬时流速的变化情况比较复杂, 测定和计算比较困难。各点时均流速的变化也可以在一定程度反映该点的剪切力变化趋势, 脉动流速则可以反映测点的紊动程度, 而且测定和计算相对比较简单。因此, 通过测定反应器内膜面附近时均流速及脉动流速来研究各种实验条件的变化对膜面剪切力的影响。另外, 在设置导流板时, 由于气泡的提升作用以及导流板的导流作用, 反应器内混合液主要为竖直垂直于膜组件、围绕导流板的 $y-z$ 平面内循环流动(坐标设置如图 4 所示)。因此, x 向的时均流速分量很小, 均小于 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在后面的讨论中不再讨论 x 向时均流速。实验中的时均流速均为 40 s 时均流速。

2 实验结果与讨论

2.1 增设导流板对膜面流速的影响

分别在无导流板和在距离膜组件两侧 50 mm 处设置平板导流板两种情况下, 测定膜组件平行的纵断面 (110, -219, 700+z) 各点的 40 s 时均流速及脉动流速。由图 5 (a) 可见, 在膜组件下端附近, 加设导流板后, 与无导流板时相比, 上升流速 V_z 值最大增幅约为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直于膜面的流速 V_y 的最大增幅约为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 5 (b)

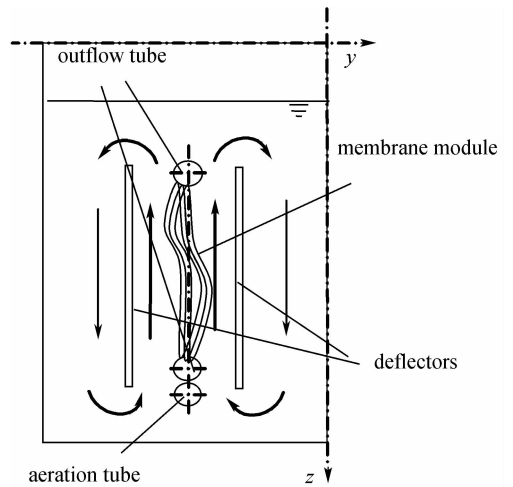


图 3 导流板安装位置

Fig. 3 Installation diagram of deflectors

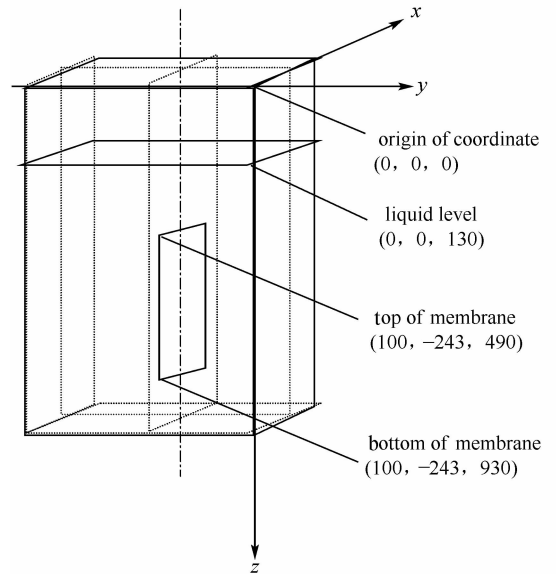


图 4 膜反应器坐标设置

Fig. 4 Set-up diagram of coordinates for membrane reactor

可见, 设置导流板可以明显提高膜组件中下部脉动流速 v_z 、 v_y , 最大提高幅度约为 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以上实验结果表明, 增设导流板可以增强混合液的紊动性, 进而增强对膜面的剪切作用, 有助于延缓膜面滤饼层的形成, 缓解浓差极化现象。

2.2 导流板与膜组件距离对膜面流速的影响

导流板与膜组件的距离会影响气水混合液的上升断面面积, 进而会对气水混合液的含气率产生影响。而含气率的大小会决定气泡对气水混合液的提升效果和气水混合液的上升流速。减小导流板与膜组件的距离, 可以提高导流板与膜组件之间混合液

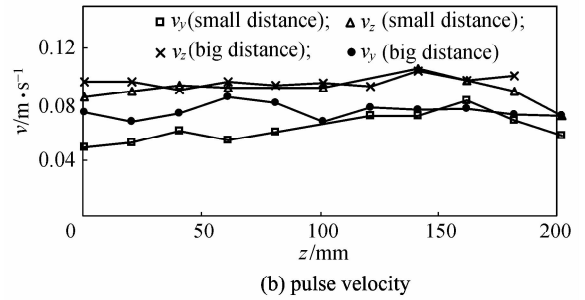
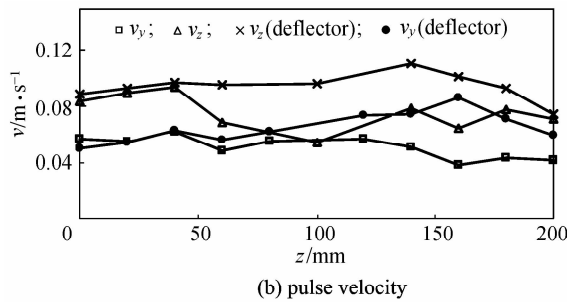
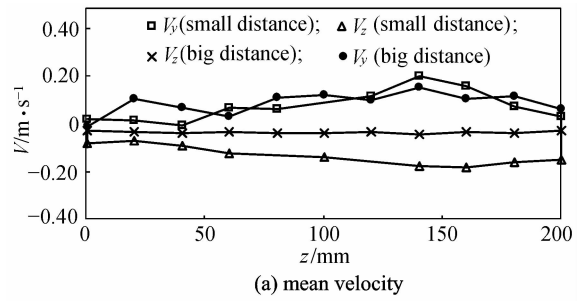
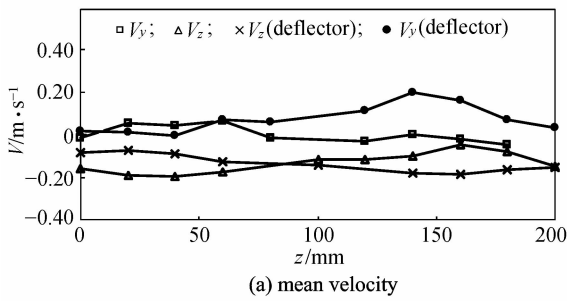


图 5 导流板对膜面附近流速的影响

图 6 导流板与膜组件距离对膜面流速的影响

Fig. 5 Effect of deflector on flow rate near membrane surface

Fig. 6 Effect of distance between deflector and membrane on velocity on membrane surface

(flow rate of effluent is $18.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
aeration intensity is $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

(flow rate of effluent is $18.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
aeration intensity is $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

的含气率，使气水混合液的上升流速增大。同时也会使导流板与膜组件之间的上升阻力增大，又有使上升流速减小的趋势。导流板与膜组件的距离太小也会限制膜丝的摆动。因此，导流板与膜组件之间存在最佳距离。由图 6 可见，与大距离（距膜组件中心 80 mm）相比，小距离（距膜组件中心 50 mm）时，上升流速 V_z 明显增大（膜组件下部增大约 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，中部增大 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。与小距离相比，大距离时，混合液横向流及返混现象更为显著，因而大距离的 v_y 较大。

2.3 出水量对膜面流速的影响

膜出水量的变化会改变膜面附近的流速分布。由图 7 (a) 可见，增大出水量后（出水膜通量由 $20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $30 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ），膜组件中下部上升流速 V_z 略有增大；而对于垂直于膜面的 y 向流速 V_y ，随出水量的增大，指向膜面的流速 V_y 有所增大（在图中表现为远离膜面的为正向的 V_y 值的减小）。由图 7 (b) 可见，增大出水量，反应器内混合液的脉动流速变小。这可能是由于出水量增大，会使导流板两侧的循环流量减小，进而使循环流速降低，也使混合液的紊动程度有所降低。

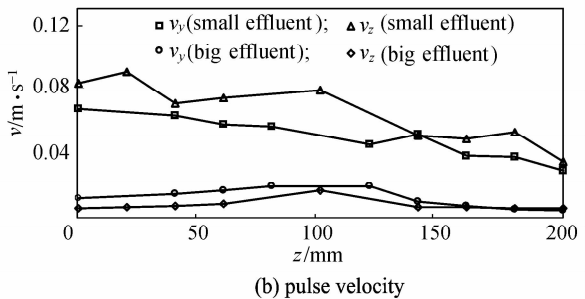
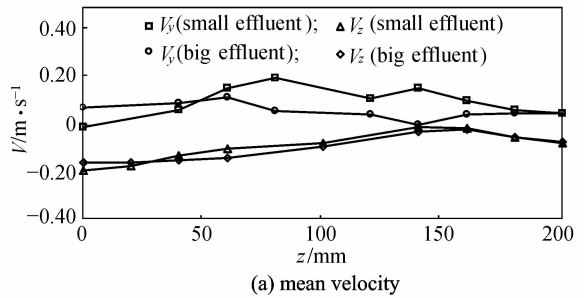


图 7 出水量对膜面附近流速的影响

Fig. 7 Effect of effluent flow rate on velocity near membrane surface

(distance between deflector and membrane is 50 mm,
aeration intensity is $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

2.4 曝气强度与膜面流速的关系

曝气量 (Q_g) 的大小会直接决定反应器内混

合液的气含率, 进而影响气水混合液对膜面的剪切强度。通常, 采用气水比 (Q_g 与出水量的比值) 作为膜反应器的设计参数, 反映单位产水量所需的 Q_g , 可以作为计算反应器运行能耗的设计参数。但是, 由于该参数没有体现气泡通过反应器断面的流速及流量, 因而不能反映曝气对反应器的搅拌效果, 也不能反映 Q_g 变化所引起的气水混合液对膜面的剪切强度的变化。而气相折算速度 (J_g) 及真实含气率则考虑了反应器内气体通道的断面, 可以更直观地反映 Q_g 变化对反应器扰动强度的影响, 也可以更好地反映 Q_g 变化对膜面剪切力的影响^[12-14]。

在本实验中, Q_g 与 J_g 的关系为^[15]

$$J_g = Q_g / A_g \quad (1)$$

式中 Q_g 为曝气量, $m^3 \cdot h^{-1}$; J_g 为气相折算速度, $m \cdot s^{-1}$; A_g 为气体通过的截面积, m^2 。设置导流板后, 鼓入膜反应器内的气体只在导流板与膜组件之间的区域内上升, 假设气泡在该区域内均匀分布, 则有

$$A_g = 2bl \quad (2)$$

式中 b 为导流板宽度, l 为导流板与膜组件的间距。取 $l = 50 \text{ mm}$, $b = 370 \text{ mm}$, 则 $A_g = 0.037 \text{ m}^2$ 。

实验结果也证实, Q_g 会影响流速。由图 8 (a) 可见, Q_g 增大 (Q_g 由 $0.3 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$ 增大到 $0.6 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$, 气水比由 15 : 1 增大到 30 : 1), 流速 (z 向流速) V_z 也随之增大, 而且从膜组件下端向上, 气泡行程越大, V_z 的增加幅度也越大。同时, 垂直于膜面的 y 向流速 V_y 也随 Q_g 的增大而增大, 流速的波动幅度也增大 (下部 V_y 较小是由于气泡为刚生成的微气泡, 对混合液扰动强度较小)。图 8 (b) 也表明, Q_g 增大, y 、 z 方向的脉动流速均增大。图 9 为 Q_g 与反应器内时均流速的关系。时均上升流速 V_z 与 Q_g 的关系符合关系式

$$V_z = -0.0167 \ln Q_g - 0.1329 \quad (3)$$

式 (3) 中的负号是由于实验坐标以垂直向下为 z 轴正向, 而 V_z 主要为上升流速。

脉动上升流速 v_z 与 Q_g 的关系符合关系式

$$v_z = 0.0182 \ln Q_g + 0.1149 \quad (4)$$

若用 J_g 来表示曝气强度, 则在实验中 J_g 与 V_z 及 v_z 的关系可分别表示为

$$V_z = -0.0167 \ln J_g - 0.0778 \quad (5)$$

$$v_z = 0.0182 \ln J_g + 0.0549 \quad (6)$$

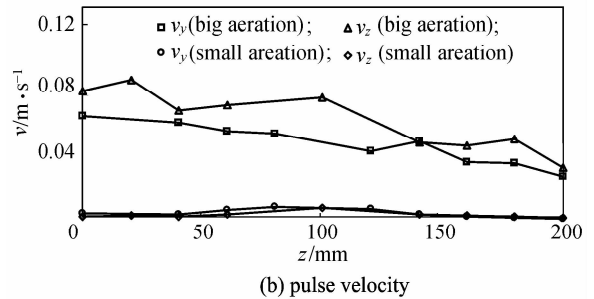
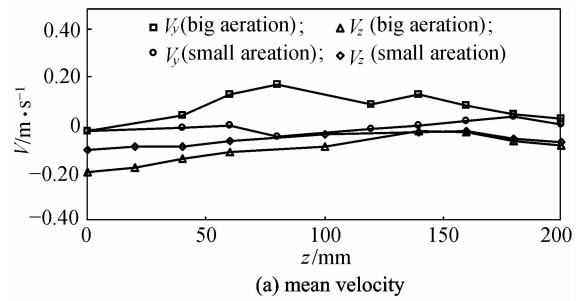


图 8 曝气量对膜面流速的影响

Fig. 8 Effect of aeration intensity on flow velocity near membrane surface

(distance between deflector and membrane is 50 mm, effluent flow rate is $18.5 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$)

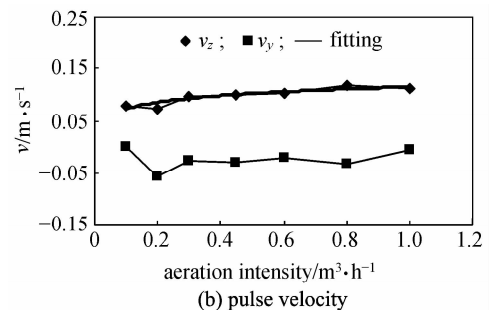
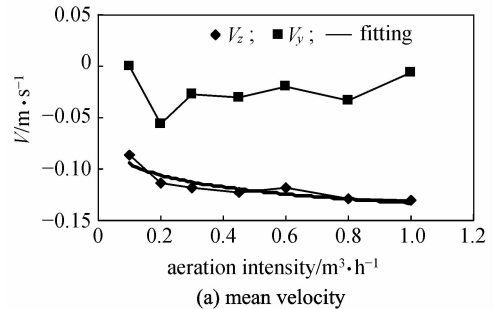


图 9 曝气量与膜面流速的关系

Fig. 9 Relationship of aeration intensity and flow velocity near membrane surface

(distance between deflector and membrane is 50 mm, effluent flow rate is $18.5 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$)

这说明, Q_g 增大后, 混合液的紊动性增大, 气水混合液对膜面的剪切强度也增大。但当曝气强度增加到一定数值后, 对混合液上升流速及脉动流速的增加幅度会逐渐减小。考虑增大曝气量会增大能耗, 因此, 存在一个最佳曝气强度。

3 结 论

(1) 利用 LDV 可以较准确地测定反应器内气水混合液的时均流速及脉动流速的变化情况。

(2) 增设导流板可以增强混合液的紊动性, 进而增强对膜面的剪切作用, 有助于延缓膜面滤饼层的形成, 缓解浓差极化现象。导流板与膜组件的间距缩小, 上升流速 V_z 明显增大。因而在膜反应器内增设合适间距的导流板有助于减缓膜污染。

(3) 增大出水量, 上升流速增大, 指向膜面的流速 V_y 也有所增大; 曝气强度也会影响流速, 时均上升流速 V_z 与曝气强度的关系符合 $V_z = -0.0167 \ln J_g - 0.0778$, 脉动上升流速 v_z 与曝气强度的关系符合 $v_z = 0.0182 \ln J_g + 0.0549$ 。增大气量后, 混合液的紊动性增大, 气水混合液对膜面的剪切强度也增大。

References

- [1] Shi Jun (时均), Yuan Quan (袁权), Gao Congjie (高从增). Handbook of Membrane Technology (膜技术手册). Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 171
- [2] Wiesner M R, Clark M M, Mallevalle J. Membrane filtration of coagulation suspensions. *Journal of Environmental Engineering*, 1989, **115** (1): 20-40
- [3] Amy G L, Gollins M R, Kuo C J, *et al.* Comparing gel permeation chromatography and ultra-filtration for the molecular weight characterization of aquatic organic matter. *Journal AWWA*, 1987, **79** (1): 43-49
- [4] Xu Wendong, Shankaraman Chellam, Dennis A Clifford. Indirect evidence for deposit rearrangement during dead-end microfiltration of iron coagulated suspensions. *Journal of Membrane Science*, 2004, **239** (2): 227-241

- [5] Liu C J, Yuan X G, Yu K T, Zhu X J. A fluid-dynamics model for flow pattern on a distillation tray. *Chemical Engineering Science*, 2000, **55** (12): 2287-2294
- [6] Liu C J, Yuan X G. Computational fluid-dynamics of liquid phase flow on distillation column trays. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2002, **10** (5): 522-526
- [7] Gao Yong, Zhao Jun, Zhang Guanghui, *et al.* Treatment of the wastewater containing low-level 241Am using flocculation-microfiltration process. *Separation and Purification Technology*, 2004, **40** (2): 183-189
- [8] Luo Xin, Zhang Ying, Gu Ping. Study on membrane pre-coating used in membrane bioreactors//Proceedings of the 7th International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering, 2004. Tianjin, China, 2004: 396-403
- [9] Kurse R, Misumi R, Komori S. Drag and lift forces acting on a bubble in a linear shear flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, **27** (7): 1247-1258
- [10] Legendre D, Magnaudet J. Drag and lift forces on a spherical bubble in a viscous linear shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, **368**: 81-126
- [11] Chen Guo (陈国), Liu Daijun (刘代俊), Liang Bin (梁斌), *et al.* Research of the turbulent velocity fluctuation in pipe reactor with a laser Doppler anemometer (LDA). *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition* (四川大学学报: 工程科学版), 2002, **34** (2): 124-126
- [12] Joshi J B, Vitankar V S, Kulkarni A A, *et al.* Coherent flow structures in bubble column reactors. *Chemical Engineering Science*, 2002, **57** (16): 3157-3183
- [13] Vial C, Camarasa E, Poncin S, Boullard J. Study of hydrodynamic behavior of bubble column and external loop airlift reactor through analysis of pressure fluctuations. *Chemical Engineering Science*, 2000, **55** (15): 2957-2973
- [14] Camarasa E, Meleiro L A C, Carvalho E, *et al.* A complete model for oxidation air-lift reactors. *Computers and Chemical Engineering*, 2001, **25** (4/5/6): 577-584
- [15] David Azbel. *Two-phase Flows in Chemical Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981: 25-37