doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.056

浸没式膜生物反应器内膜面传质特性实验*

李春丽[1]　田　瑞[2]　邱广明[1]　陶中兰[1]　文佳龙[1]

(1.内蒙古工业大学能源与动力工程学院,呼和浩特 010051;
2.内蒙古工业大学风能太阳能利用技术省部共建教育部重点实验室,呼和浩特 010051)

摘要:应用粒子图像测速(PIV)技术测试膜面附近的气液两相流动力学特性,在 6 种不同曝气强度条件下,测试得到膜面附近的液相流场数据,并计算得到膜面传质系数、浓差极化边界层厚度以及膜面切向应力等膜面传质特性参数。结果表明,曝气强度和液相速度对膜面传质特性的影响较大,在一定范围内增加曝气强度可以使得膜面传质特性加强。本文的研究结果为膜生物反应器系统的优化设计提供了研究经验和实验数据。

关键词:浸没式膜生物反应器　气液两相流　粒子图像测速技术　传质系数

中图分类号:TQ028.8;X703.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)02-0340-06

引言

浸没式膜生物反应器(SMBR)多采用超滤技术和生物处理相结合,是一种高效的水处理技术[1],膜污染问题始终是制约该技术发展的瓶颈之一。传质过程是膜分离的内在机理,通过分析膜面传质特性和强化膜面传质的影响因素可以从根本上预防膜面浓差极化的发生。近年来通过优化和改变膜表面流体力学特性已成为控制膜污染的有效途径之一[2-4]。大量研究表明 SMBR 中通过曝气在膜面形成的气液两相流可以强化膜面传质,减轻浓差极化现象[5-9]。

近年来国内外多采用粒子图像测速(Particle image velocimetry,PIV)技术对膜面气液两相流流场进行测试[10-14]。本文在 SMBR 实验测试系统上,应用 PIV 技术获得膜面的错流速度,通过改变曝气强度优化膜面的流体力学条件,从而改变和优化膜面传质特性,进而达到强化膜面传质的目的,以减轻浓差极化现象。

1　实验装置系统和方案

1.1　实验系统介绍

中试规模的浸没式中空纤维膜生物反应器实验测试系统如图 1 所示,系统主要由膜生物反应器系统、进出水系统、曝气系统、PIV 测试系统等部分组成。膜生物反应器采用全玻璃制成,为了观察气泡的运动形态,以及污泥对示踪粒子的干扰,实验以自来水替代活性污泥。采用单根曝气管曝气,膜组件放置在曝气管的正上方,膜组件是由苏州膜华材料科技有限公司提供的单片帘式中空纤维超滤膜组件,膜组件采用聚偏氟乙烯(PVDF)材质制成,分离孔径为 0.05 μm,运行中操作压力 0.01 ~ 0.05 MPa;温度 5 ~ 40℃;pH 值 2 ~ 10;膜尺寸 1.2 m × 0.6 m;标准膜通量 380 L/h。膜生物反应器及曝气系统的结构参数和运行条件见表 1,膜生物反应器的结构简图及激光断面位置见图 2。

表 1　膜生物反应器及曝气系统的主要结构参数

Tab.1　Main structural parameters of membrane bioreactor and aeration system

参数	数值
反应器尺寸 $L \times D \times H$/m × m × m	1.0 × 0.5 × 1.7
有效水深/m	1.5
膜组件出水流量 Q/(L·h^{-1})	400
曝气管管径 d_1/m	0.02
孔中心距离 l/m	0.01
曝气孔径 d_2/m	0.002
气体流量 q/(m^3·h^{-1})	2.5,3.0,3.5,4.5,5.5,6.5

1.2　PIV 测试系统

实验中使用美国 TSI 公司生产的 Power View 系列 PIV 系统,主要由激光系统、CCD 摄像系统和图像处理系统 3 部分组成,包括 Big Sky 双钕钇铝石榴石激光器和 2 个激光发射器输出绿色片光源,激光束的波长范围为 545 ~ 780 nm,最大工作频率

收稿日期:2013-08-23　修回日期:2013-10-16

*国家自然科学基金资助项目(51263013)和内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2013MS0728)

作者简介:李春丽,讲师,博士,主要从事水污染处理与控制技术研究,E-mail:lichunli16@163.com

通讯作者:田瑞,教授,博士生导师,主要从事流体力学及新能源利用技术研究,E-mail:tianr@imut.edu.cn

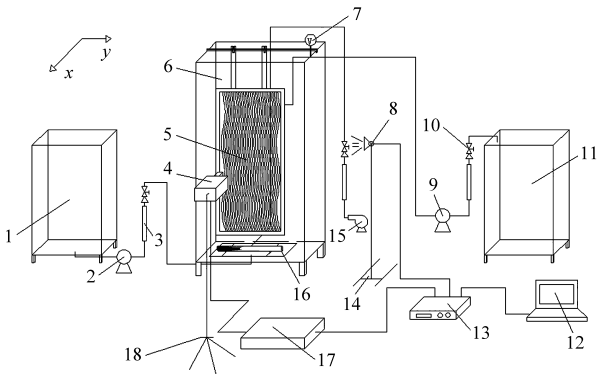

图 1　膜生物反应器实验测试系统

Fig. 1　Schematic diagram of membrane bioreactor apparatus and PIV system

1. 进水箱　2. 进水泵　3. 进水流量计　4. CCD 相机　5. 膜组件　6. 膜生物反应器　7. 压力表　8. 激光器　9. 隔膜泵　10. 阀门　11. 出水箱　12. 图像处理系统　13. 激光电源　14. 支架　15. 鼓风机　16. 曝气管　17. 同步器　18. 三脚架

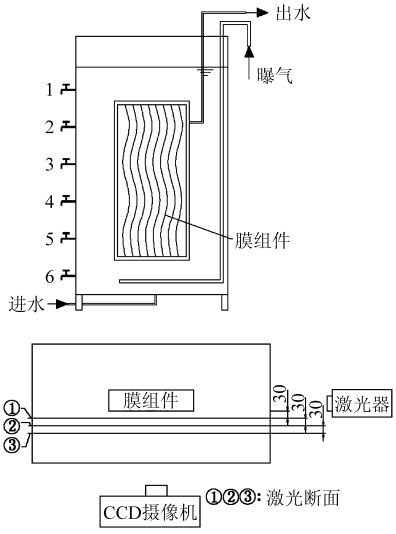

图 2　膜生物反应器结构简图及激光断面分布图

Fig. 2　Structure of MBR and leaser section detail diagram

15 Hz,能量 120 mJ/脉冲,脉宽 3 ~ 10 ns;PowerViewTM2MP CCD 相机,分辨率为 1 200 像素 × 1 600 像素,采样速率 16 帧/s;LaserPulseTM 同步器可以实现外部脉冲信号对系统的同步触发。实验中选用玻璃粉末作为示踪粒子,该粒子具有对流场良好的跟随性,粒径为 50 μm,质量分数控制在 0.5% 左右。

1.3　实验方案

实验中激光断面依次选取距膜面 3、6 和 9 cm 3 个激光断面位置(图 2),PIV 激光光源从反应器的右侧进入(图 1),形成一扇形片光源,相机放置在反应器的正面,垂直于激光片光源方向;为了保证在整个测量区域都获得较高的分辨率,拍照时将测量区沿反应器轴向分为 4 个区域进行拍照,每个拍摄区域范围为 300 mm × 300 mm,分区情况如图 3 所示。在数据处理中采用图像拼接技术获得反应器纵向高度的速度矢量。

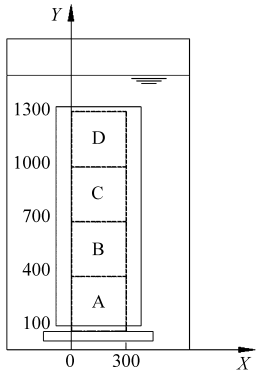

图 3　拍摄分区图

Fig. 3　Capture section diagram

实验在 2 mm 曝气孔径,2.5、3.0、3.5、4.5、5.5、6.5 m^3/h 6 种曝气强度下进行,研究曝气系统(曝气强度)改变对浸没式中空纤维膜生物反应器膜面附近液相流场流动特性的影响,并分析不同曝气强度下对应的膜面传质特性。实验中首先利用 PIV 获得了不同曝气强度下的膜面气液两相速度场,并采用相分离技术——灰度分辨法分离得到液相速度矢量场,每组实验采集 50 对 PIV 图像,分析时诊断窗口选择 64 像素 ×64 像素。

2　超滤传质基本理论与平板假设

2.1　膜面平板边界层假设

本研究中所用的膜组件为外压式中空纤维膜组件,即中空纤维的分离层在外表面,通过曝气形成的气液两相流流过垂直悬挂的单片帘式中空纤维膜组件可以看作是流体流过平板的流动,此处膜面的雷诺数可以按照平板表面的边界层雷诺数进行计算。

边界层内雷诺数为

$$Re = \frac{v_\infty x}{\nu} \tag{1}$$

式中　v_∞——来流速度

x——物面上一点到前驻点的距离,本研究中为膜组件底端到所研究位置的距离

ν——流体运动粘度

根据平板边界层雷诺数判断得到实验范围内边界层 $Re > 10^4$,属于湍流状态。

2.2　超滤传质理论基础

根据超滤过程浓差极化的传质机理,膜面浓差极化边界层的传质系数 k 对浓差极化具有重要影响,因此可以通过调节传质系数 k 减少浓差极化现象[15],而传质系数 k 取决于系统的流体力学条件(液体速度、粘度、密度、溶质扩散系数),因此通过改变膜表面的流体力学条件可以减小浓差极化边界

层厚度,提高边界层内的传质系数,进而降低浓差极化,减轻膜污染。

将传质系数与流体力学特征参数 Sherwood 数(舍伍德数)进行关联[15-16],可建立传质系数 k 与流体力学参数的关系。

根据超滤传质机理和湍流状态下传质系数经验关系式[15]可推导出本研究的传质系数为

$$k=\frac{0.04Re^{3/4}Sc^{1/3}D}{d_h} \tag{2}$$

其中 $$Sc=\frac{\nu}{D}$$

式中 d_h——水力学直径,本研究中指特征长度 x

D——扩散系数

Sc——施密特(Schmidt)数

根据传质系数的定义可求出浓差极化边界层厚度为

$$\delta=\frac{D}{k}=\frac{d_h}{0.04Re^{3/4}Sc^{1/3}} \tag{3}$$

紊流边界层内切向应力为

$$\tau_w=0.0289\rho v_\infty^2 Re_x^{-\frac{1}{5}} \tag{4}$$

式中 ρ——液体密度

3 实验结果

3.1 不同曝气强度下液相速度场分析

从图 4 不同曝气强度下对应的液相速度矢量图可以看出,在反应器轴向相同位置处,液相速度矢量随曝气强度的增加而增加。分析其原因可知:当曝气强度较低时,曝气孔间断性地形成单一气泡,2 mm孔径下形成沿轴线呈螺旋曲线上升的气泡羽流,气泡之间的合并与破碎现象不明显,气液两相流还没有形成明显的湍流状态,带动液相上升的动力较小,因此液相速度较小;当曝气强度增大后,气泡连续脱离曝气孔并且速度增加,气泡羽流在曝气孔表面形成气流柱,气泡之间的合并和破碎现象明显,传递给液相速度的动量也进一步增加;进一步增大曝气强度后,气柱被扭曲成麻花状,气泡羽流的纵向轴线摆动明显,液相速度不有明显增加。

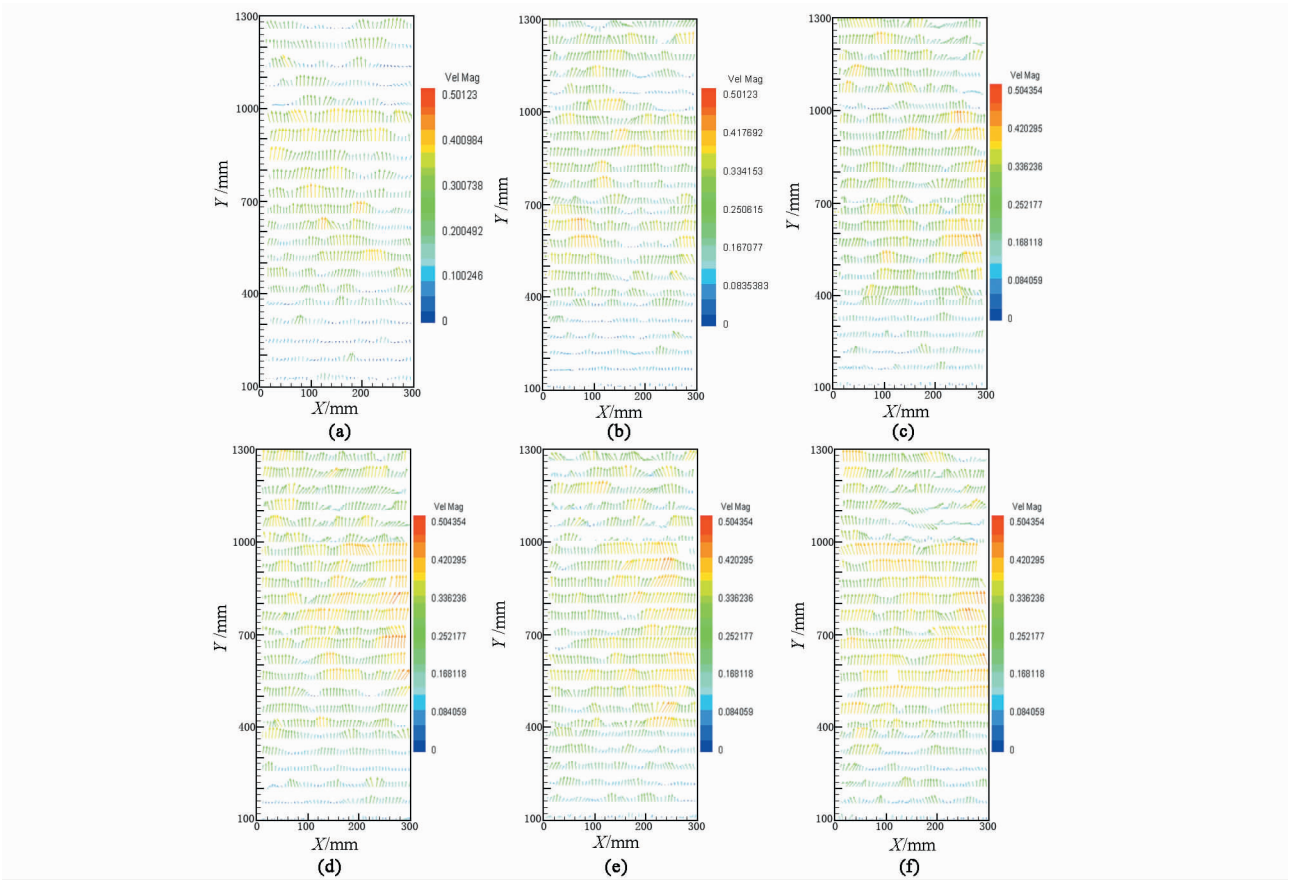

图 4 2 mm 孔径下不同曝气强度对应的液相速度矢量图

Fig. 4 Liquid velocity vector under different aeration intensity in 2 mm bore diameter

(a) 2.5 m^3/h (b) 3.0 m^3/h (c) 3.5 m^3/h (d) 4.5 m^3/h (e) 5.5 m^3/h (f) 6.5 m^3/h

从图中各曝气强度条件下的反应器纵向液相速度矢量分布均可得出:根据气泡羽流的分区,A 区域属于羽流形成区,该阶段鼓入的气流破碎成气泡,和周围的液体进行混合,在羽流形成区液相初始速度较低,并且随着高度的增加,羽流纵向液相速度增加明显。进入反应器中部 B、C 区域,气泡羽流进入羽

流形成后区，随着气泡上升过程中所受压力的降低，引起气泡增大，从而所受浮力增大，气泡上升速度增加，带动液相速度增加，但同时流体的运动阻力也在增加，此时液相流速的增加开始变得缓慢，该区域内的液相速度达到整个反应器纵向速度的最大值；进入反应器上部 D 区域，是气泡羽流的表面流区，气泡羽流表现为横向流动，在轴向方向上有速度梯度，该区域的液相速度不稳定，液相速度波动较大，同时气泡上升过程中形成的尾涡导致很大的能量损失并增加了流动的阻力，使得 D 区的液相速度有所降低，而且出现了明显的液相回流现象。

3.2　曝气强度对膜面传质特性的影响

为了分析曝气强度对膜面传质系数、浓差极化边界层厚度以及膜面切向应力等传质特性参数的影响，实验分析了 2 mm 曝气孔径下，不同曝气强度对应的 A、B、C、D 各区域中心点的膜面传质特性，来流速度取基于 PIV 测得的距离膜面 3 cm 处各曝气强度下 A、B、C、D 各区域中心的液相速度。

计算过程中引用杨宏志等[17]的研究，即 25℃时以超滤膜截留蛋白质时扩散系数 D 为 7.55×10^{-11} m^2/s，运动粘度 ν 为 8.93×10^{-7} m^2/s，计算得到 Sc 数为 1.18×10^{4}，分析结果如图 5 ~ 10 所示。

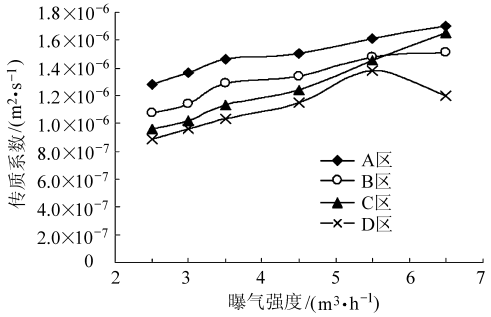

图 5　传质系数随曝气强度的变化曲线

Fig. 5　Curve of mass transfer coefficient changing with aeration intensity

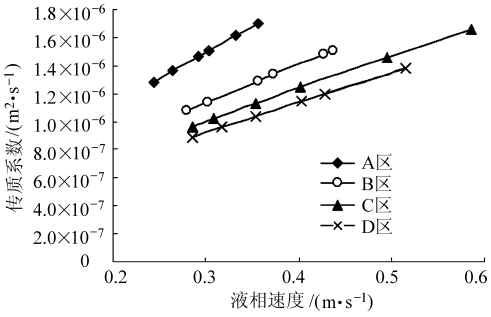

图 6　传质系数随液相速度的变化曲线

Fig. 6　Curve of mass transfer coefficient changing with liquid velocity

图 5 ~ 10 给出了表征膜面传质特性的传质系数、浓差极化边界层厚度以及切向应力随曝气强度和膜面液相速度的变化趋势。由图 5、6 可得，在 A、B、C、D 各区域中心位置处，膜面的传质系数均随曝气强度和膜面液相速度的增加而增加，这是由于在反应器高度相同位置处，传质系数取决于边界层雷

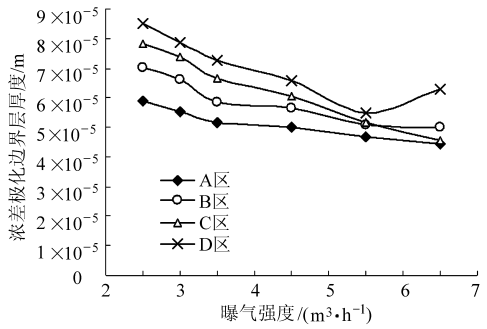

图 7　浓差极化边界层厚度随曝气强度的变化曲线

Fig. 7　Curve of concentration polarization boundary layer thickness changing with aeration intensity

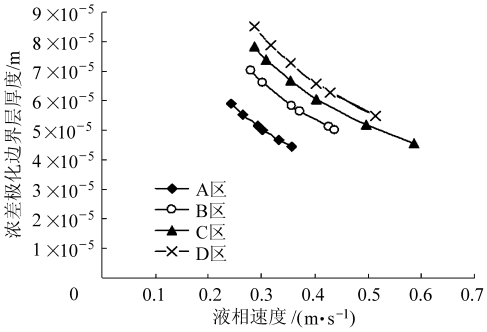

图 8　浓差极化边界层厚度随液相速度的变化曲线

Fig. 8　Curve of concentration polarization boundary layer thickness changing with liquid velocity

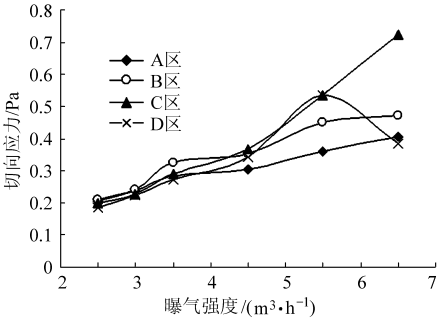

图 9　切向应力随曝气强度的变化曲线

Fig. 9　Curve of shear stress changing with aeration intensity

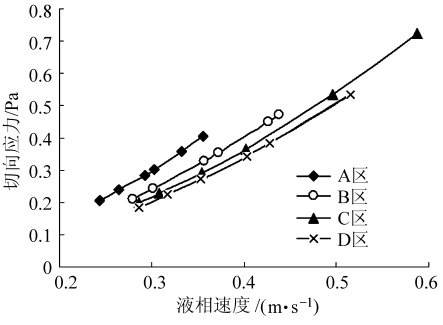

图 10　切向应力随液相速度的变化曲线

Fig. 10　Curve of shear stress changing with liquid velocity

诺数,并与 $Re^{3/4}$ 呈正比,而边界层雷诺数随着膜面液相速度的增加而增加,因此曝气强度增加会使膜面传质系数增加,而膜面传质系数的增加有利用降低浓差极化现象;分析反应器高度不同位置处的传质系数分布规律得出,在曝气强度一定的情况下,反应器不同高度的传质系数受液相速度和特征长度 x 的共同影响,反应器纵向高度上液相速度呈现先增加后趋于降低的趋势,同时传质系数与特征长度(膜组件底端到所分析的位置)$x^{1/4}$ 呈反比,综合两因素,随着反应器纵向高度的增加,传质系数逐渐降低。由图 7、8 可得,在 A、B、C、D 各区域中心位置处,浓差极化边界层厚度均随曝气强度的增加而逐渐降低,这是由于在反应器高度相同位置处,边界层厚度主要取决于边界层雷诺数,与 $Re^{3/4}$ 呈反比,膜面边界层雷诺数随液相速度的增加而增加,气液两相流对膜面的冲刷效果好,使得边界层厚度有所降低,因此边界层厚度随着雷诺数的增加而降低;曝气强度一定的情况下分析反应器高度不同位置的浓差极化边界层厚度得出,随着反应器 A、B、C、D 各区域纵向高度的增加,边界层厚度逐渐增厚,说明在反应器的 D 区域,超滤膜的传质系数较低,边界层厚度增加,膜污染现象比较明显。由图 9、10 可以看出,膜面的切向应力随曝气强度和液相速度的增加而增加,这是因为切向应力是由曝气形成的气液两相流在膜面形成的,膜面的切向应力随错流速度的增大而增大,切应力的增加会阻止在膜面形成浓差极化边界层,因此通过增加曝气强度可以增加液相流场对膜面的切应力,减轻膜面浓差极化现象的发生。A 区中心位置处切向应力的增加比较平缓,B、C 区切向应力随曝气强度的增加比较明显,D 区中心位置随曝气强度的增加,切向应力先增加后出现下降,这与液相速度在反应器高度的变化趋势相对应。

4 结束语

在改变曝气强度的条件下,通过 PIV 技术获取了中空纤维膜面液相速度矢量场,基于超滤浓差极化的传质机理以及气液两相流流经外压式中空纤维膜面可视为流体绕平板边界层流动的假设,分析了曝气强度改变对膜面传质系数、浓差极化边界层厚度以及切向应力等传质特性参数的影响研究。研究结果表明,在一定范围内增加曝气强度,会增加膜面错流速度,反应器轴向各区域液相速度矢量分布规律反映了气泡羽流在反应器轴向的形成过程:A 区气泡羽流处于羽流形成区,羽流边界无混合紊动;反应器中部 B、C 区气泡羽流处于羽流形成后区;D 区形成了气泡羽流的表面流区;膜面传质特性的传质系数、浓差极化流边界层厚度以及切向应力随曝气强度和膜面液相速度的变化表明,在一定范围内增加曝气强度会使得膜面传质系数增加,浓差极化边界层厚度较低以及膜面剪切向应力增加,在本研究曝气强度范围内,可以强化膜面传质特性,浓差极化模数越低,有利于减轻膜污染问题。

参 考 文 献

1 苗蕾,王捷,罗南. 浸没外压式中空纤维膜组件的最佳尺度分析[J]. 天津工业大学学报,2009,28(6):1-6.
Miao Lei, Wang Jie, Luo Nan. Optimizing and designing of submerged outside-inside hollow membrane module[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2009, 28(6):1-6. (in Chinese)

2 Cui Z F, Chang S, Fane A G. The use of gas bubbling to enhance membrane processes [J]. Journal of Membrane Science, 2003, 221(1-2):1-35.

3 Le-Clech P, Chen V, Fane A G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2006,284(1-2):17-53.

4 Wakeman R J, Williams C J. Additional techniques to improve microfitration [J]. Separation and Purification Technology, 2002, 26(1):3-18.

5 Tardieu E, Grasmick A, Geaugey V, et al. Hydrodynamic control of bioparticle deposition in a MBR applied to wastewater treatment[J]. Journal of Membrane Science, 1998,147(1):1-12.

6 Fane A G, Chang S, Chardon E. Submerged hollow fibre membrane module-design options and operational considerations[J]. Desalination, 2002,146(1-3):231-236.

7 Madec A, Buisson H, Aim R B. Aeration to enhance membrane critical flux[C]// Proceedings of the 8th World Filtration Congress,2000,1:199-202.

8 Defrance L, Jaffrin M Y. Comparison between filterations at fixed transmembrane pressure and fixed permeate flux: application to a membrane bioreactor used for wastewater treatment[J]. Journal of Membrane Science, 1999,152(2):203-210.

9 Cheng I S, Le-clech P, Jefferson B, et al. Membrane fouling in membrane bioreator for wastewater treatment[J]. Environ. Eng. Sci.,2002,128(11):1 018-1 029.

10 Yeo Adrian P S, Law Adrian W K, Fane A G. Factors affecting the performance of a submerged hollow fiber bundle [J]. Journal of Membrane Science, 2006, 280:969-982.

11 Liu Ningyu, Zhang Qide, Chin Gim-Leong, et al. Experimental investigation of hydrodynamic behavior in a real membrane bio-

reactor unit[J]. Journal of Membrane Science, 2010,353(1 – 2):122 – 134.
12 李春丽,田瑞,邢世录,等. 基于 PIV 技术的膜生物反应器内液相流场特性研究[J]. 中国给水排水,2013,29(5):85 – 89.
Li Chunli, Tian Rui, Xing Shilu, et al. Hydrodynamic characteristics of liquid phase flow in MBR based on PIV [J]. China Water Wastewater, 2013,29(5):85 – 89. (in Chinese)
13 李春丽,田瑞,陶中兰,等. 膜生物反应器内流场动力学特性的 PIV 实验研究[J]. 环境工程学报,2013,7(3):918 – 924.
Li Chunli, Tian Rui, Tao Zhonglan, et al. Research on dynamics characteristics of flow field in MBR by PIV technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013,7(3):918 – 924. (in Chinese)
14 李春丽,田瑞,陶中兰,等. 基于 PIV 技术的膜生物反应器流场动力特性研究[J]. 工程热物理学报,2013,34(3):501 – 504.
Li Chunli, Tian Rui, Tao Zhonglan, et al. Research of dynamics characteristics of flow field in the MBR based on the PIV technology[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013,34(3):501 – 504. (in Chinese)
15 Marcel Mulder. 膜技术基本原理[M]. 李琳译. 2 版. 北京:清华大学出版社,1999.
16 Lee Y H, Cho J, Lee J W, et al. Modeling of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment [J]. Desalination, 2002, 146(1 – 3): 451 – 457.
17 杨宏志, 梁英, 王曦,等. 超滤苹果汁时成分分析及试验结论[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,1997,9(1):73 – 76.
Yang Hongzhi, Liang Ying, Wang Xi, et al. Ingredient analysis and experimental result of apple juice by ultra filtration method [J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 1997,9(1):73 – 76. (in Chinese)

Mass Transfer Characteristics of Membrane Surface in SMBR

Li Chunli[1]　Tian Rui[2]　Qiu Guangming[1]　Tao Zhonglan[1]　Wen Jialong[1]

(1. *College of Energy and Power Engineering*, *Inner Mongolia University of Technology*, *Huhhot* 010051, *China*
2. *Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy of the Ministry of Education*,
Inner Mongolia University of Technology, *Huhhot* 010051, *China*)

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) technique was used to test the gas-liquid two-phase flow field dynamics above the membrane approach in six different aeration intensity conditions. The liquid flow field above the membrane approach was tested, and the membrane surface mass transfer, thickness of concentration polarization boundary layer, shear stress and some other mass transfer parameters of membrane surface were calculated. The conclusion shows that the aeration intensity and liquid phase velocimetry strongly influence the characteristic of membrane surface mass transfer, and the aeration intensity increased in a certain range can make the membrane surface mass transfer characteristic strengthen. The paper provides experimental data and research experience for optimization design of membrane bio-reactor.

Key words: Submerged membrane bio-reactor　Gas-liquid two phase flow　Particle image velocimetry technology　Mass transfer coefficient