doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.047

基于 PIV 荧光粒子法的膜面气液两相流场特性研究

李春丽[1]　郭劲君[2]　王志强[1]　田　瑞[1,2]

(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: 采用 PIV 荧光粒子法研究了 1.0、1.5、2.5 mm 3 种不同的曝气孔径下,不同曝气强度对膜面气液两相流流场流体力学的影响。实验应用 Size - Shape - Analysis 模块分析了在曝气孔径为 1.5 mm、曝气强度为 24 L/h 条件下,膜面流场中气泡的运动规律以及 3 种不同曝气孔径在曝气强度为 24、48、72、96、140、180、220 L/h 下近膜面雷诺应力的变化规律。结果表明由 1.5 mm 曝气孔径产生气泡运动过程中,气泡形态呈椭圆形,等效直径主要集中在 5 ~ 6 mm 之间,大部分气泡速度集中在 0.1 ~ 0.2 m/s 之间;曝气强度的增加与雷诺应力的变化呈正相关关系;在本实验条件下,1.5 mm 曝气孔径、140 L/h 曝气强度下可产生较大的雷诺应力的变化,为最佳曝气孔径与曝气强度取值。本研究为优化膜生物反应器内流场进而减轻膜污染提供了理论依据。

关键词: 浸没式膜生物反应器; PIV 荧光粒子法; 气液两相流; 雷诺应力

中图分类号: X703; TQ028.8　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)12-0373-06

Characteristics of Flow Field near Membrane Surface in Submerged Membrane Bioreactor Based on PIV Fluorescent Particle Method

Li Chunli[1]　Guo Jinjun[2]　Wang Zhiqiang[1]　Tian Rui[1,2]

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

Abstract: Submerged membrane bio-reactor (SMBR) is a high-efficiency wastewater treatment technology that combines membrane separation technology with traditional biological treatment technology. The effect that regularity of aeration intensity and aeration pore sizes on fluid mechanics characteristics of hollow fiber membrane surface was analyzed based on the PIV fluorescent particle technology. The bubbles movement of flow field near membrane surface in the aeration pore was studied when its size was 1.5 mm by using Size - Shape - Analysis modular, and the changing rule of Reynolds stress on the surface of membrane under seven aeration intensities of 24 L/h, 48 L/h, 72 L/h, 96 L/h, 140 L/h, 180 L/h and 220 L/h was investigated. The results indicated that the bubble shape was oval and its equivalent diameter was concentrated in 5 ~ 6 mm when bubble aeration was exercised by the 1.5 mm aperture with velocities on the bubble were 0.1 ~ 0.2 m/s. Aeration intensity was positively correlated with Reynolds stress. Aeration pore size of 1.5 mm and aeration intensity of 140 L/h was considered as the best aeration pore size and aeration intensity values, because it can provide a greater Reynolds stress. This subject laid a theoretical foundation for the optimization of flow field in membrane bioreactor so as to improve the membrane fouling problem.

Key words: submerged membrane bioreactor; PIV fluorescent particle method; gas-liquid two phase flow; Reynolds stress

收稿日期: 2016-04-27　修回日期: 2016-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51263013)和内蒙古工业大学科学研究重点项目(ZD201508)

作者简介: 李春丽(1977—),女,副教授,博士,主要从事水污染处理与控制技术研究,E-mail: lichunli16@163.com

通信作者: 田瑞(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事流体力学与新能源利用技术研究,E-mail: tianr@imut.edu.cn

引言

浸没式膜生物反应器由于具有对污染物去除效率高、出水质量高、污泥产量低、占地面积小等优点,在污水处理领域应用越来越广泛[1]。浸没式膜生物反应器运行过程中,膜组件放置在活性污泥混合液中实现固液分离,但污泥组分中的胞外多聚物、微生物代谢产物和细微胶体等会在膜表面沉积形成致密的凝胶层而限制膜生物反应器的正常运行,因此对膜污染的控制一直是研究的热点与难点[2-5]。有研究表明,通过向反应器中投加聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM)增加悬浮颗粒的粒径可以有效地缓解膜污染的形成[6-7];MANSOURPANAH 等[8]在聚酰胺薄膜生成过程中使用紫外线(UV)照射与丙烯酸改性的界面聚合技术,生成的膜组件具有很强的抗污染能力;LI 等[9]研究了浸没式膜生物反应器中,中空纤维膜丝振动对控制膜污染的影响,得出膜丝的横向振动可以有效地控制膜污染。

曝气系统是膜生物反应器的重要组成部分,在维持高浓度生化降解的同时,可以在反应器内形成气液两相流减轻沉积物质在膜表面的沉积。王捷等[10]应用 CFD 对膜生物反应器内气液两相流场进行模拟研究发现,选择不均匀的曝气方式可以使反应器内流体速度分布更均匀,改善膜表面的不均匀污染;CHEN 等[11]发现短时间内增加曝气量可以在膜表面提供较大的剪切力,有效地减轻固体悬浮颗粒在膜表面的沉积。但 VERRECHT 等[12]研究发现浸没式膜生物反应器运行中膜清洗曝气与生化工艺曝气能耗约占系统总能耗的 76%,因此通过研究浸没式膜生物反应器内不同曝气系统对近膜面流场特性的影响,进而选择合适的曝气方法对改善膜污染问题具有指导意义。

粒子图像测速技术(Particle image velocimetry,PIV)作为一种瞬时全场测速技术,已经成熟地应用于单向流动的测试,近年来将 PIV 技术应用于气液两相流场的测试中也逐渐得到学者们的关注[13-16]。KOSIWCZUK 等[17]应用荧光粒子法分别对气液两相流粒子跟踪实现相分离,并采用互相关算法计算得到相分离后气液两相的速度场分布;LIU 等[18]应用 PIV 荧光粒子法对膜生物反应器膜组件进行研究,并通过互相关分析法分析了不同时刻气液两相流的速度与气泡的分布情况。李春丽等[19-22]应用 PIV 测速技术及灰度分辨法的相分离技术研究了不同曝气速度与不同曝气孔径下膜面液相速度场分布,并应用 Tecplot 软件分析得出液相流涡量特性。郭枭等[23]应用 PIV 荧光粒子法研究了浸没式膜生物反应器中膜组件在 3 种曝气孔径不同曝气强度下膜面湍流强度和液相平均速度的变化规律。

为了进一步获得贴近膜面的流场特性,从而分析膜面流场特性与膜面浓差极化的关系,本文在自主搭建的浸没式中空纤维膜生物反应器膜面流场测试系统基础上,运用 PIV 荧光粒子法获得气泡在中空纤维膜面的上升运动特征和速度等动力学形态以及曝气孔径与曝气强度对膜面雷诺应力的影响,以期为优化膜生物反应器内流场进而改善膜污染状况提供理论依据。

1 实验装置、仪器及方法

1.1 膜面流场测试系统

浸没式中空纤维膜生物反应器膜面流场测试系统如图 1 所示,系统主要由进出水系统、膜面流场测试装置、曝气系统、负压抽吸系统以及 PIV 测试系统 5 部分组成。实验中流场测试采用美国 TSI 公司生产的 Power View 系列 PIV 系统,并结合荧光粒子法,测试系统还包括激光系统、同步器、2 台 CCD 摄像系统及配套滤镜和图像处理系统 4 部分。

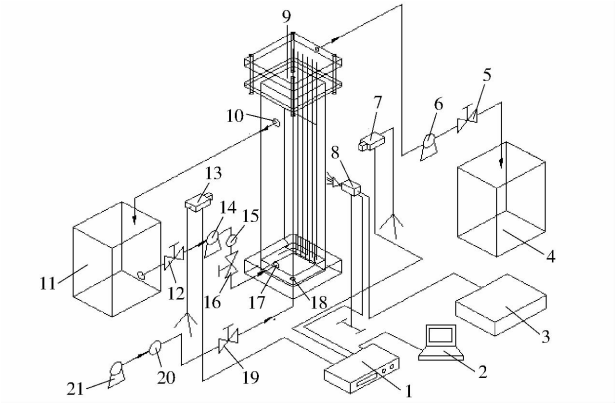


图 1 膜面流场测试系统流程图

Fig. 1 Schematic diagram of flow field near membrane surface test system

1. 同步器 2. 图像处理器 3. 激光电源 4、11. 水箱 5、12、16、19. 阀门 6、14. 泵 7、13. CCD 相机 8. 激光器 9. 膜面流场测试装置 10. 出水口 15. 液体流量计 17. 进水口 18. 进气口 20. 气体流量计 21. 气源

1.2 膜面流场测试装置

如图 2 所示,膜面流场测试装置是有机玻璃制成的长方体,尺寸(长 × 宽 × 高)为 100 mm × 100 mm × 632 mm。为了保证 PIV 系统能够获得膜面的流场信息,实现对膜面气液两相流场的同步测试研究,在清水条件下,用 2.5 mm 测光纤维代替中空纤维进行流场测试。6 根光导纤维单排排列,相

邻纤维净间距为 10 mm，光纤下端固定，上端可调高度。气体经稳压后通过曝气孔进入到测试装置底部的光纤之间，形成不同形态的气泡在膜面上升。5 个不同孔径的曝气孔设置在相邻两根膜丝之间，曝气孔眼直径分别为 1.0 mm（2 个）、1.5 mm（2 个）、2.5 mm（1 个）。

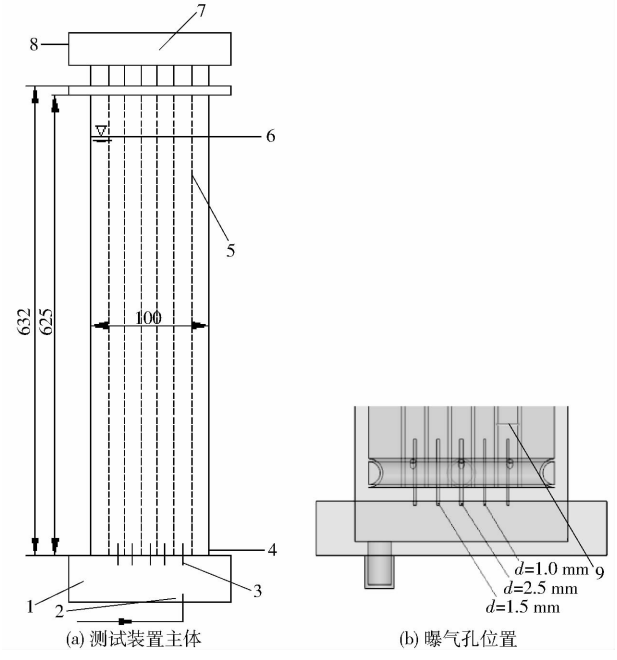


图 2　近膜面流场测试装置图

Fig. 2　Flow field near membrane surface test apparatus

1. 稳压腔体　2. 进气口　3. 曝气孔　4. 进水口　5. 膜丝（光纤）　6. 出水口 1　7. 负压腔体　8. 出水口 2　9. 膜丝间距

1.3　PIV 荧光粒子法

PIV 荧光粒子法是目前国际上最为先进和准确的相分离技术，由于采用硬件来进行相分离，此法除了需要价格昂贵的荧光粒子和用于产生足够亮度图像的高能量激光外，还需采用同步器连接 2 台黑白相机。PIV 荧光粒子法中连续相（液相）的运动由荧光粒子标记，当荧光粒子被光源照射时，粒子发射出的光与原照射光的颜色不同（即光的波长发生了改变），但是气泡的散射光颜色还与原照射光一致，因此只需通过分辨不同颜色反射光的方法就可以使两相得到分离，各相分离后采用单相图像的处理技术就可获得每一相的速度场。

本实验中同时使用 2 台布置在流场两侧的黑白 CCD 相机，相机垂直拍摄激光照亮的膜面流场，捕捉不同相的运动。一台相机只捕捉荧光粒子（连续相）的图像，在镜头前安装高通滤镜，只接受荧光粒子发射的 570 ~ 580 nm 的荧光信号，避免了光纤反射的强光；另一台相机只接受气泡运动的激光散射光图像，在相机镜头前安装了（532 ± 5）nm 窄带滤波镜，过滤了荧光粒子的散射光。

2　实验方案

本文在清水实验条件下，采用 PIV 荧光粒子流场测试技术，在曝气系统（曝气强度、曝气孔径）改变的情况下，分析曝气系统对中空纤维膜面气液两相流流场流体力学特性的影响。曝气孔径分别为 1.0、1.5、2.5 mm，曝气强度由小到大依次为 24、48、72、96、140、180、220 L/h。曝气池反应器主要结构参数与运行条件如表 1 所示。

表 1　曝气池反应器主要结构参数和运行条件

Tab. 1　Main structural parameters and operation conditions of aeration tank

参数	数值
反应器尺寸（mm × mm × mm）	100 × 100 × 632
膜丝数量/个	6
相邻膜丝间距 H/mm	10
曝气孔孔径 d/mm	1.0、1.5、2.5
曝气强度 Q/（$L \cdot h^{-1}$）	24、48、72、96、140、180、220

由于本研究中使用荧光粒子作为示踪粒子，故选择与膜面相切的面作为激光断面，2 台 CCD 相机布置在垂直于激光断面的位置，分别捕捉连续相流场中荧光粒子图像与离散相中气泡的运动。PIV 拍摄区域和激光断面如图 3 所示，PIV 拍摄区域宽度以 6 根膜丝外边缘（65 mm）为界，高度以曝气孔向上 200 mm 区域为界限，区域面积（高 × 宽）为 200 mm × 65 mm。为便于后续分析，由左向右 6 根光纤编号依次为 1、2、3、4、5、6 号。2 号和 3 号光纤之间曝气孔径为 1.5 mm，3 号和 4 号光纤之间曝气

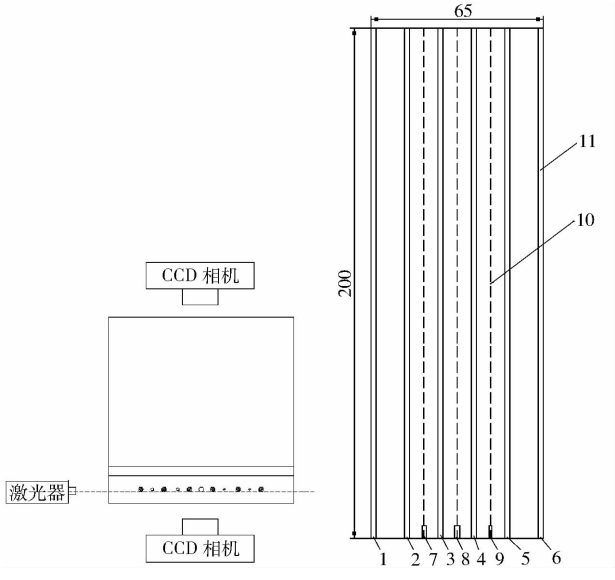


图 3　PIV 拍摄区域和激光断面

Fig. 3　PIV capture region and leaser section

1 ~ 6. 光导纤维编号　7. 1.5 mm 曝气孔　8. 2.5 mm 曝气孔　9. 1.0 mm 曝气孔　10. 曝气孔中心线　11. 膜丝

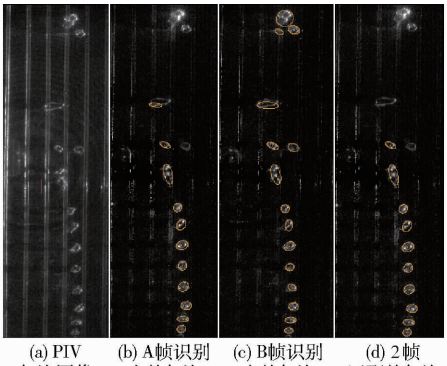
孔径为 2.5 mm,4 号和 5 号光纤之间曝气孔径为 1.0 mm。

3 结果与分析

3.1 1.5 mm 曝气孔径下气泡速度场分析

为进一步优化浸没式膜生物反应器流场特征,实验分析了 1.5 mm 曝气孔径在较低曝气强度(24 L/h)下气泡在近膜面流场的运动特性。选用较低的曝气强度主要是因为较高的曝气强度会在气泡上升的过程中产生合并破碎现象,不利于 PIV 中 Size - Shape - Analysis 模块对气泡运动的分析。

图 4 给出了利用 Size - Shape - Analysis 模块分析得到的 24 L/h 曝气强度、1.5 mm 曝气孔径下气泡运动上升过程中的形态特征,利用 A、B 2 帧图像匹配的互相关算法得到气泡的速度及尺寸见表 2,表中 U 为气泡运动水平速度分量,V 为气泡运动垂直速度分量。如表 2 所示,Size - Shape - Analysis 模块对气泡的识别率较高,除了序号 1 的气泡没有得到匹配,速度显示为零,其余气泡都得到了很好的识别。图 5 给出了气泡运动的矢量图。



(a) PIV 气泡图像 (b) A帧识别出的气泡 (c) B帧识别出的气泡 (d) 2帧匹配的气泡

图 4 1.5 mm 孔径下气泡分析过程

Fig. 4 Analysis process of bubble with 1.5 mm bore diameter

表 2 1.5 mm 孔径下气泡的速度与等效直径

Tab. 2 Velocity and equivalent diameter of bubbles with 1.5 mm bore diameter

序号	X/mm	Y/mm	U/(m·s^{-1})	V/(m·s^{-1})	等效直径/μm
1	153.339	-70.716	0	0	4 336.925
2	159.359	-96.323	0.002	0.203	4 979.108
3	161.421	-115.179	0.066	-0.144	6 362.591
4	167.499	-136.736	0.012	0.251	5 410.958
5	169.888	-147.854	0.023	-0.124	6 188.512
6	170.411	-161.062	0.118	0.167	6 691.699
7	170.673	-174.174	0.108	0.586	5 612.422
8	171.292	-187.804	-0.709	0.005	6 221.381
9	173.036	-199.945	0.209	0.210	5 976.143
10	171.005	-208.663	0.056	0.160	5 153.552
11	169.987	-215.080	0.167	0.509	5 006.341

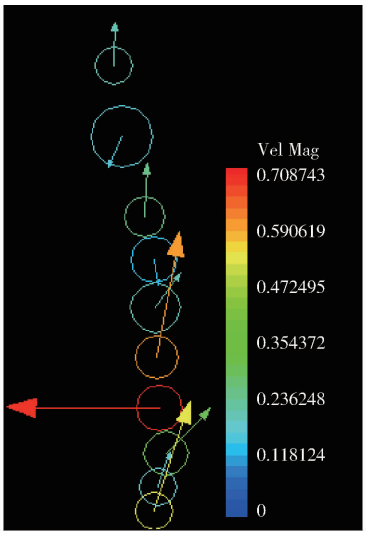


图 5 气泡速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector diagram of bubbles

通过分析图 4、5 以及表 2 的数据可知,1.5 mm 曝气孔径下,气泡向上运动过程中,水平运动速度比较小,轴向上气泡的运动速度变化比较明显,最大运动速度可达 0.586 m/s,最小速度为 0.005 m/s,平均速度为 0.209 m/s,且大部分气泡速度集中在 0.1 ~ 0.2 m/s 之间;上升中的气泡形态呈椭圆形,等效直径主要集中在 5 ~ 6 mm 之间,气泡等效直径的变化趋势为先增加后减小。分析原因,主要是因为气泡在膜面流场上升过程中,气泡在各点所受作用力的不同,在曝气孔附近,气泡所受压强较大,表现为气泡尺寸较小;随着气泡向上运动,气泡所受压强减小,气泡尺寸增大;同时气泡在上升过程中受重力、浮力以及液体流动的相互作用力,使气泡在运动过程中速度不断变化。

3.2 曝气强度对膜面雷诺应力的影响分析

选取 3 种不同曝气孔径的曝气孔,分析了以曝气孔中心轴线为基准,距离曝气孔 0 ~ 200 mm 高度上,不同曝气强度形成的两相流紊流流动引起的雷诺应力的变化。在流场测试实验基础上,由 tecplot 软件计算得到各曝气强度对应一段时间内的液相平均速度场,并计算得出曝气孔中心轴线等距离近膜面处的雷诺应力。计算结果如图 6 所示。

由图 6 可知,3 种曝气孔径对应的中心轴线高度上雷诺应力的变化规律相似:在靠近曝气孔附近(高度小于 50 mm)时,各曝气强度下雷诺应力均比较低,雷诺应力数量级集中在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ Pa 附近;轴向高度大于 50 mm 时,各曝气强度下雷诺应力增加幅度加快。分析原因,主要是因为随着气泡上升高度的增加,气泡体积增大而产生更大的液相脉动,从而引起雷诺应力的增加。

由同一曝气孔径不同曝气强度引起的雷诺应力

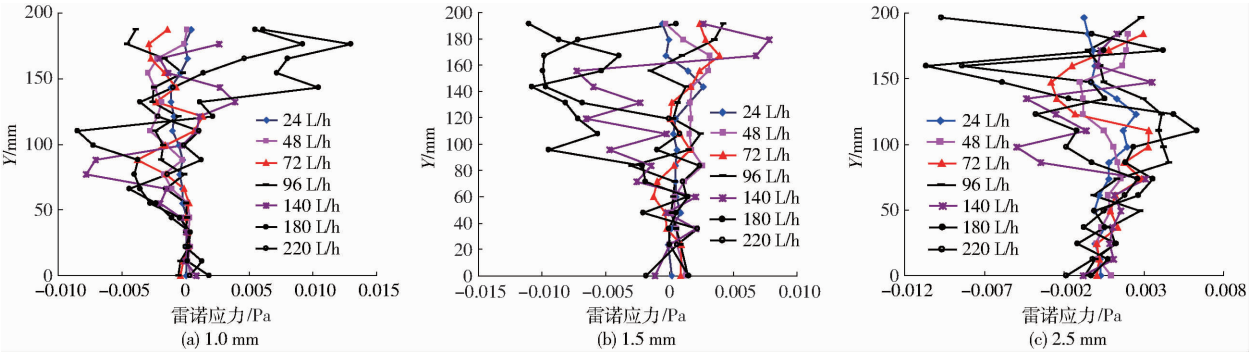


图 6　不同曝气孔径下曝气孔上方雷诺应力分布

Fig. 6　Reynolds stress distributions above aeration hole at three different bore diameters

变化可知，曝气强度与雷诺应力的变化整体呈正相关关系。较小的曝气强度引起的雷诺应力变化幅度比较小，较高的曝气强度下（140、180、220 L/h），雷诺应力可达到 10^{-3} Pa 左右，其中曝气强度为 180 L/h 和 220 L/h 时，雷诺应力可达到 10^{-2} Pa。当曝气强度大于 140 L/h 时，雷诺应力的变化随曝气强度的增加幅度变小。相比曝气孔径 1.5 mm 与 2.5 mm 时曝气孔轴向雷诺应力的变化，曝气孔径为 1.0 mm 时轴向雷诺应力的变化幅度要小很多。分析原因，主要是由于曝气强度的增加使气泡在气液两相界面形成时产生了更大的流动速度，从而在气泡上升过程中对近膜面产生了更大的液相脉动，引起雷诺应力的增大；随着曝气强度的不断增加，气泡上升运动引起的液相脉动变化减小，导致轴向上雷诺应力的变化随曝气强度的增加幅度减小。而 1.0 mm 孔径产生的初始气泡比 1.5 mm 与 2.5 mm 时气泡小得多，在上升过程中气泡尺寸变化幅度较小，从而对近膜面流场液相脉动影响较小，产生较小的雷诺应力变化幅度。

综合以上分析可知，靠近曝气孔处的位置，产生的雷诺应力比较小，随着距离曝气孔垂直距离的增加，各曝气强度下雷诺应力的变化幅度增加明显；1.5 mm 与 2.5 mm 孔径比 1.0 mm 孔径下可产生更强的雷诺应力，1.5 mm 与 2.5 mm 孔径下产生的雷诺应力大致相同，较大的曝气孔径在相同曝气强度下产生的初始速度较小，不利于产生较大的液相脉动；曝气强度的增加对雷诺应力的影响也很显著，曝气强度大于 140 L/h 时，曝气强度变化对雷诺应力作用不明显。因此，在 1.5 mm 曝气孔径下，140 L/h 的曝气强度在膜面可产生较强的液相脉动，可增加对膜面的冲刷强度，对减轻膜污染作用明显，为最佳参数选择。

4　结论

（1）搭建了膜面流场测试实验系统，为近距离获取膜面流场信息，实验采用可透光的纤维光纤代替中空纤维膜丝，采用 PIV 荧光粒子法，通过在 2 台相机前分别加装高通滤镜和窄带滤镜实现同时获取膜面气液两相流场的流体力学特性分析。

（2）利用 PIV 系统的 Size－Shape－Analysis 模块分析曝气强度为 24 L/h、1.5 mm 曝气孔径下气泡运动形态发现，气泡垂直方向上运动速度变化比较明显，最大运动速度为 0.586 m/s，最小速度为 0.005 m/s，平均速度为 0.209 m/s，且大部分气泡速度集中在 0.1～0.2 m/s 之间；上升中的气泡形态呈椭圆形，等效直径主要集中在 5～6 mm 之间，气泡等效直径的变化趋势为先增加后减小。

（3）分析曝气强度对膜面雷诺应力的影响：靠近曝气孔处的位置，产生的雷诺应力比较小，随着与曝气孔垂直距离的增加，各曝气强度下雷诺应力变化幅度增加明显；曝气强度的增加与雷诺应力变化呈正相关关系。较小的曝气强度引起的雷诺应力的变化幅度比较小，较高的曝气强度下（140、180、220 L/h）可产生较大的雷诺应力变化；1.5 mm 与 2.5 mm 孔径比 1.0 mm 孔径下可产生更强的雷诺应力，1.5 mm 与 2.5 mm 孔径下产生的雷诺应力大致相同。在 1.5 mm 曝气孔径下，140 L/h 的曝气强度在膜面产生较大的液相脉动，可增加对膜面的冲刷强度，对减轻膜污染作用明显。

参　考　文　献

1　MOHAMMAD H, SABZALI A, GhHOLAMI M, et al. Comparative study of SMBR and extended aeration activated sludge processes in the treatment of high-strength wastewaters[J]. Desalination, 2012, 287: 109－115.

2　NOURI N, MEHRNIA M R, SARRAFZADEH M H, et al. Performance of membrane bioreactor in presence of flocculants[J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(16－18): 2933－2938.

3　MANNINA G, COSENZA A. The fouling phenomenon in membrane bioreactors: assessment of different strategies for energy saving

[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 444: 332 - 344.
4 DREWS A. Membrane fouling in membrane bioreactors—characterisation, contradictions, cause and cures[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 363(1): 1 - 28.
5 XU M, WEN X, HUANG X, et al. Mechanisms of membrane fouling controlled by online ultrasound in an anaerobic membrane bioreactor for digestion of waste activated sludge[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 445: 119 - 126.
6 YU Z, SONG Z, WEN X, et al. Using polyaluminum chloride and polyacrylamide to control membrane fouling in a cross-flow anaerobic membrane bioreactor[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 479: 20 - 27.
7 WHANG G D, CHO Y M, PARK H, et al. The removal of residual organic matter from biologically treated swine wastewater using membrane bioreactor process with powdered activated carbon[J]. Water Science and Technology, 2004, 49(5 - 6): 451 - 457.
8 MANSOURPANAH Y, HABILI E M. Preparation and modification of thin film PA membranes with improved antifouling property using acrylic acid and UV irradiation[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 430: 158 - 166.
9 LI T, LAW A W K, JIANG Y, et al. Fouling control of submerged hollow fibre membrane bioreactor with transverse vibration[J]. Journal of Membrane Science, 2016,505:216 - 224.
10 王捷, 吴义, 罗南, 等. 用 CFD 方法模拟膜生物反应器内部流场及布气优化[J]. 土木建筑与环境工程, 2014(2): 119 - 125.
WANG Jie, WU Yi, LUO Nan, et al. CFD simulation and optimization of internal hydrodynamic characteristics and aerating distribution in membrane bioreactor[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2014(2): 119 - 125. (in Chinese)
11 CHEN W, LIU Y, LIU J. Selecting aeration in a PVDF flat-sheet membrane bioreactor for municipal wastewater treatment[J]. Desalination and Water Treatment, 2015,57(14): 6193 - 6201.
12 VERRECHT B, MAERE T, NOPENS I, et al. The cost of a large-scale hollow fibre MBR[J]. Water Research, 2010, 44(18): 5274 - 5283.
13 KELLER J, MÖLLER G, BOES R M. PIV measurements of air-core intake vortices[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 40: 74 - 81.
14 MARTINELLI L, GUIGUI C, LINE A. Characterisation of hydrodynamics induced by air injection related to membrane fouling behaviour[J]. Desalination, 2010, 250(2): 587 - 591.
15 AITYT A A, KOLAAS J, JENSEN A, et al. A PIV investigation of stratified gas-liquid flow in a horizontal pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 61: 129 - 143.
16 代钦, 康文. 基于图像分割的两相流 PIV/PTV 测量技术[J]. 实验流体力学, 2008, 22(2): 88 - 94.
DAI Qin, KANG Wen. PIV/PTV two-phase flow measurement technique based on image separation [J]. Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(2): 88 - 94. (in Chinese)
17 KOSIWCZUK W, CESSOU A, TRINITE M, et al. Simultaneous velocity field measurements in two-phase flows for turbulent mixing of sprays by means of two-phase PIV[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(5): 895 - 908.
18 LIU N, ZHANG Q, CHIN G L, et al. Experimental investigation of hydrodynamic behavior in a real membrane bio-reactor unit [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 353(1): 122 - 134.
19 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]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(3): 918 - 924. (in Chinese)
20 李春丽, 邢世录, 陶中兰, 等. 膜生物反应器近膜面流场特性实验研究[J]. 膜科学与技术, 2013(2): 63 - 69.
LI Chunli, XING Shilu, TAO Zhonglan, et al. Experimental study on flow field characteristics on the surface of membrane module in the MBR[J]. Membrane Science and Technology, 2013(2): 63 - 69. (in Chinese)
21 李春丽, 田瑞, 邱广明, 等. SMBR 内流体力学特性实验和数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(3): 485.
LI Chunli, TIAN Rui, QIU Guangming, et al. Experimental and numerical simulation study characteristics of flow field in the hydromechanics SMBR[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(3): 485. (in Chinese)
22 李春丽, 田瑞, 邱广明, 等. 浸没式膜生物反应器内膜面传质特性实验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2):340 - 345.
LI Chunli, TIAN Rui, QIU Guangming, et al. Mass transfer characteristics of membrane surface in SMBR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2): 340 - 345. (in Chinese)
23 郭枭, 李春丽, 邱广明, 等. 基于粒子图像测速技术的近膜面流场特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 91 - 97.
GUO Xiao, LI Chunli, QIU Guangming, et al. Characteristics of flow field near membrane surface based on particle image velocimetry technology[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 91 - 97. (in Chinese)