

文章编号: 1006-4710(2015)04-0434-05

# 不同高径比下气液两相流流场结构的实验研究

王蒙<sup>1</sup>, 程文<sup>1</sup>, 孙楠<sup>2</sup>, 魏江伟<sup>3</sup>, 程文娟<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048; 2. 山西省  
水利水电科学研究院, 山西 太原 030002; 3. 长庆油田公司第五采油厂采油工艺研究所, 陕西 西安 710200)

**摘要:** 气液两相流是好氧曝气过程中产生的一种复杂的气液流动形态, 其流型、流态对曝气反应器的运行效率具有重要的影响。本研究使用高速摄影机获得气泡羽流的流场图像, 再经图像处理 and 数值计算来研究气泡羽流的空隙率参数, 测得空隙率值在气泡羽流中的分布, 并结合羽流摆动频率对不同纵横比下的羽流运动情况进行分析。研究表明, 当曝气装置纵横比为 1.0 时, 气液两相流的流场分布均匀, 频谱稳定, 能形成稳定的气液环流, 使气泡在液相中的停留时间变长, 可以有效地提高氧传质的效率, 改善曝气效果。

**关键词:** 曝气; 气液两相流; 不稳定结构; 纵横比; 氧传质效率

**中图分类号:** U664.9+2      **文献标志码:** A

## Experimental study of flow structure of gas liquid two-phase flow under different aspect ratio

WANG Meng<sup>1</sup>, CHENG Wen<sup>1</sup>, SUN Nan<sup>2</sup>, WEI Jiangwei<sup>3</sup>, CHENG Wenjuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shanxi Institute of Water Resources and Hydropower Research, Taiyuan 030002, China; 3. Oil Recovery plant No. 5 Changqing Oilfield Corp. Ltd, Institution of quantitative oil process, Xi'an 710200, China)

**Abstract:** The gas liquid two-phase flow is a kind of complex gas-liquid flow morphology produced in the process of oxygen-bearing aeration, whose flow type and flow morphology are of important effect upon the operation of aerating reactor. In this study, the high-speed camera is used to obtain the original images of bubble plume flow field and then the void fraction parameters of the bubble plume flow are studied through the image processing and numerical calculation to measure the distribution of void fraction value in bubble plume flow and in combination with plume swing frequency, the plume flow movement condition under the different aspect ratios are analyzed. The research result indicate that when the aspect ratio of aeration device is 1.0, the flow field distribution of gas-liquid two-phase flow is even with stable frequency spectrum so as to form the stable gas-liquid circulation, whereby making the bubbles study longer in the liquid phase in such a way that oxygen transmission efficiency can be effectively raised and aeration performance can be improved greatly.

**Key words:** aeration; gas liquid two-phase flow; unstable structure; aspect ratio; oxygen transfer efficiency

曝气是污水好氧生化处理系统中的一个重要工艺环节, 是将空气中的氧通过气液接触, 强制转移到反应器中液体的过程, 可以为生化处理中的微生物提供必要的溶解氧, 同时曝气还可以提高池内水流的湍动程度, 保证氧传质效果<sup>[1]</sup>。曝气装置广泛应

用于实际工程特别是污水处理设施中, 提高曝气效率可以有效提高污水处理能效, 因此, 对曝气装置进行结构优化具有重要意义<sup>[2]</sup>。

气液反应器是以气体为动力, 形成气液混合物的整体有序循环, 所形成的气液两相流可以有效的

收稿日期: 2015-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076130)。

作者简介: 王蒙, 男, 博士生, 研究方向为流体力学与数值计算。E-mail: qq182172436@163.com。

通讯作者: 程文, 女, 教授, 博导, 博士, 研究方向为流体力学与数值计算。E-mail: Wencheng@xaut.cdu.cn。

增加反应器中的传质效率。根据 Vandu<sup>[3]</sup> 等的研究发现,氧总转移系数  $K_L$  随表观气速的增加而增大,氧转移效率  $E_A$  却随表观气速的增大而略有下降,所以,气液两相流结构的不稳定性与氧传质的效率密切相关。研究气液两相流的运动规律,增加气泡在水中的停留时间,可以增加气相与液相的接触时间和面积,形成有效的气液循环,提高曝气装置的运行效率。在本项研究中,使用高速摄影机获得气液两相流的流场图像,再经过数字图像处理得到流场的灰度分布,并通过平均灰度与投影空隙率的相关曲线,计算出气液两相流在不同工况条件下空隙率的二维分布<sup>[4-5]</sup>,再使用快速傅立叶变换得到羽流摆动的频率和峰值,并对实验获取的流场特征参数进行分析对比,最终得出优化的曝气装置结构设计。

## 1 实验研究

实验装置如图 1 所示,用一个长方形有机玻璃容器模拟曝气池,尺寸为矩形面长 800 mm,宽 300 mm,侧面厚 40 mm,在实验中通过空气压缩机由底部气针为容器供气,模拟曝气。实验中使用的水为纯水,实验环境温度为 18~20 °C。实验中设定的控制参数如下:气体通量为  $Q$ ,控制在  $(2.95 \sim 3.95) \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  之间,容器的纵横比为  $H/W$ ,选取 1.0、1.5、2.0 三种工况条件,气泡半径为  $R$ ,由所得的一系列图像经处理计算后得到。

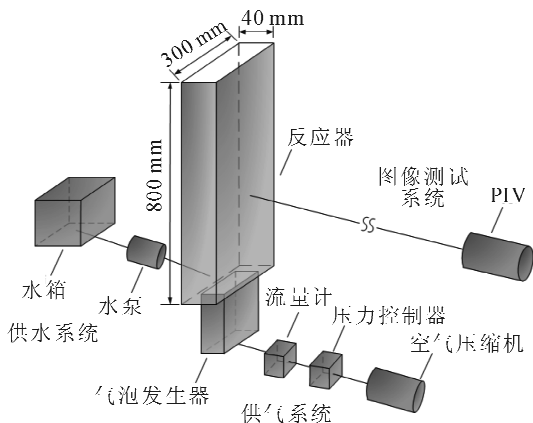


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of experimental system

## 2 空隙率分布测量

本研究中,通过图像处理技术,对实验中获取的气液两相流运动图像进行处理,其原理是利用流场中气泡的不互相重叠部分,计算气泡的平均灰度,再根据流场空隙率与图像灰度间的关系,得到气液两相流流场的空隙率分布<sup>[6-7]</sup>。

投影空隙率是指划分平面上的体积网格中,气相所占的百分比,空隙率可通过投影空隙率的二维坐标获得,再根据气泡的灰度变化情况,即可得到气泡的局部平均灰度与投影空隙率间的相关曲线。投影空隙率的计算公式如式(1):

$$\alpha(N) = \frac{(4/3)\pi R^3 N}{A_s L} \quad (1)$$

式中,  $R$  为气泡半径,  $A_s$  指单位网格的投影面积,  $A_s L$  为单位网格体积,  $N$  为气泡数量。

根据 Murai 等的研究,当  $N$  个气泡中的 1 个气泡的投影面积为  $A_b$  时,气泡的投影率为:

$$\beta(N) = \frac{\left[ N - \sum_{i=1}^N \beta(i) \right] A_b}{A_s} \quad (2)$$

体积网格的气泡平均灰度值可由式(3)计算:

$$B(i, j) = f(i, j) [1 - \beta(N)] \quad (3)$$

式中,  $i, j$  是图像区域横坐标与纵坐标的像素坐标值,  $f(i, j)$  为实验测量位置的计算灰度值。

当有  $N$  个气泡在划分的单位网格中时,气泡平均灰度计算公式如式(4):

$$B(N) = \left[ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n B(i, j) \right] / A_s + B_0 \quad (4)$$

式中,  $m, n$  是图像区域横坐标与纵坐标的像素值,  $B_0$  为背景灰度值。

在三种不同的纵横比下,根据获得的平均灰度值与投影空隙率的相关曲线,可以得到气液两相流空隙率值的二维分布<sup>[8]</sup>。其相关曲线如图 2 所示。

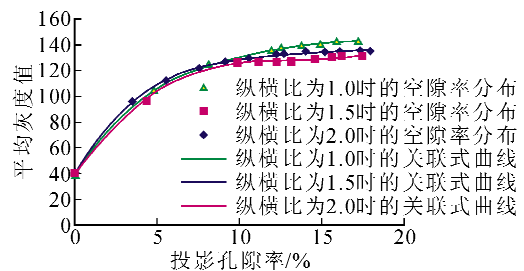


图 2 三种纵横比下空隙率与灰度值的相关曲线

Fig. 2 The correlation curve between the bubbles average grayscale and projection void fraction

## 3 结果与讨论

根据现有实验条件,气液两相流的运动形态会受到诸多因素的影响,其中纵横比是影响气液两相流运动形态的主要因素之一<sup>[9]</sup>。在本研究中,实验分析了在 15 kPa 的压力下,三种不同纵横比条件下的气液两相流流场和空隙率的变化。本研究从 27 种实验工况中,选取了表观气速及空隙率变化较大的三种工况进行分析,并对气液两相流的流型、流态

进行了对比。三种实验工况( $P_a = 15 \text{ kPa}$ )见表 1。

表 1 实验工况  
Tab. 1 Experimental conditions

工况	$Q / (10^{-5} \text{ m}^3/\text{s})$	$H/W$	$R/\text{mm}$	空隙率/%
1	3.95	1.0	1.12	10.0
2	3.46	1.5	1.05	9.0
3	2.95	2.0	0.98	8.0

当压强为 15 kPa 时,三种纵横比下气液两相流的形态、平均灰度与空隙率分布如图 3~5 所示。

当纵横比为 1.0 时,气液两相流的运动变化主要在底部,由于液相深度较浅,整个气泡羽流流场稍显收缩,整体流场能形成稳定的摆动结构,并有部分气泡在上升至流场顶部后,沿边壁向下运动。

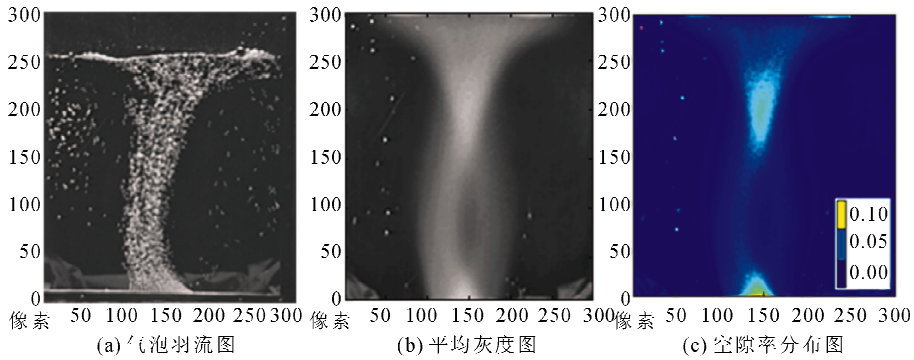


图 3 纵横比为 1.0 时气泡羽流、平均灰度和空隙率分布图

Fig. 3 The bubble plume, average grayscale and void fraction distribution at aspect ratio of 1.0

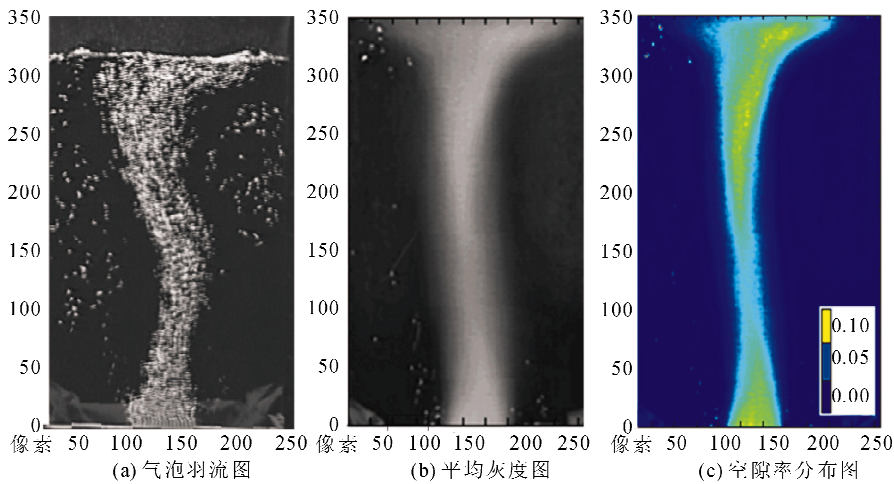


图 4 纵横比为 1.5 时气泡羽流、平均灰度和空隙率分布图

Fig. 4 The bubble plume, average grayscale and void fraction distribution at aspect ratio of 1.5

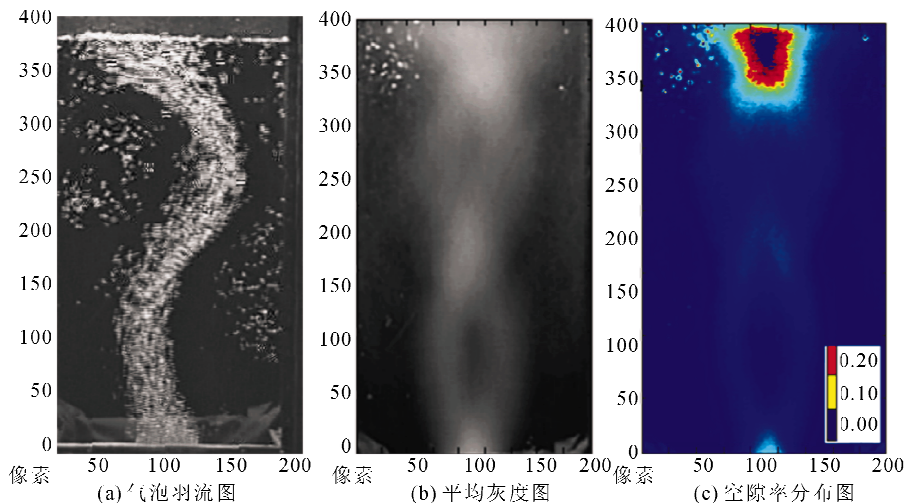


图 5 纵横比为 2.0 时气泡羽流、平均灰度和空隙率分布图

Fig. 5 The bubble plume, average grayscale and void fraction distribution at aspect ratio of 2.0

流场中的空隙率值分布均匀,约为8%,气相体积对气液两相流的影响较小,气液两相流保持稳定的运动状态、稳定的流场结构和气液循环,增加了气泡在液体中的接触面积和时间,有利于氧在液体中传质效率的增加<sup>[10-11]</sup>。

当纵横比为1.5时,气液两相流的运动变化主要在中部,气液两相流沿着中心线上升,并在上升过程中逐渐出现杂乱无章的曲折摆动,达到顶部时羽流遭到破坏,最大空隙率值均匀分布于气液两相流中心和顶端的位置,在10%左右,气泡在羽流顶端较为集中,气液两相流的运动型态较为稳定,但在一定程度上会对氧传质效果有所影响。

当纵横比为2.0时,气液两相流呈现蜿蜒上升的蛇形运动,流场摆动明显,空隙率值约为7%,但流场顶部出现空隙率值较大的区域,约为20%,导致气相在流场中分布及不平衡;同时,高纵横比还造成气泡在流场顶部聚集,大量气泡直接溢出水面,形成了不稳定的流场结构和较差的气液循环,导致氧传质效率低下。

通过对获得的气液两相流图像进行快速傅立叶变换处理,可以得到以反应器中心为原点的羽流摆动频谱(见图6)。

对图中不同纵横比下的气液两相流摆动频率进行对比,可得出以下几点。

1) 当纵横比为1.0时,流场中心不同深度的羽流摆动频率相似,频谱的峰值呈规律变化,约为0.01 Hz。稳定的摆动频谱和峰值都表明该纵横比下的气液两相流流场具有很好的稳定性。

2) 当纵横比为1.5时,靠近羽流中心区域的摆动明显,流场在距离反应器中心20~40 mm处向边壁发展时,羽流摆动频率峰值开始出现,约为0.006 Hz,羽流摆动的范围为0~140 mm,说明羽流流场的摆动并未到达边壁,无法带来全场的液相扰动与循环,这与前文所得的分析结论一致。

3) 当纵横比为2.0时,羽流在流场底部(15~463 mm)的摆动频率峰值要远大于中上部,其频率峰值约为0.02 Hz。

从以上分析得出,随着纵横比的增加,流场中羽流摆动的频率和运动分布会产生一定的变化,导致流场的循环能力减弱及不稳定结构的出现,在一定程度上影响了流场的液相循环及液面更新效率。

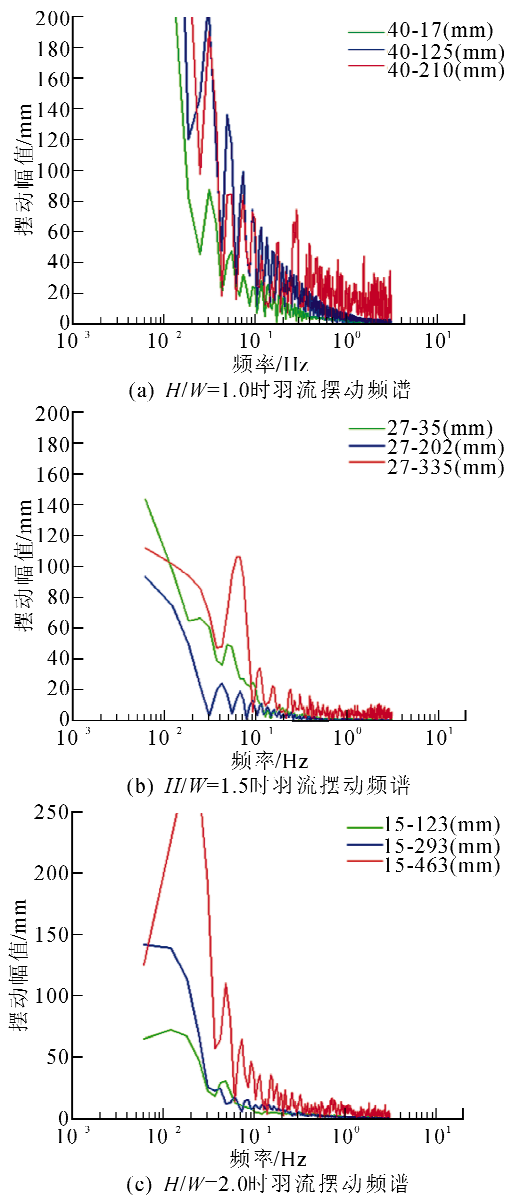


图6 不同纵横比下羽流摆动频谱图

Fig. 6 The frequency spectra of bubble plume oscillation at different aspect ratio

## 4 结论

本研究使用仿曝气装置,通过一系列实验,来研究不同纵横比下的气液两相流的运动形态,并利用平均灰度与空隙率间的关系,得到了气液两相流流场的空隙率分布,再通过分析气液两相流流场的形态与空隙率分布,比对羽流的摆动频率及峰值,得出不同纵横比下气液两相流稳定性的结论,并由此推导曝气装置的最优结构设计。通过分析,得出以下结论。

1) 纵横比是影响气液两相流运动形态的重要



因素,当纵横比为 1.0 时,气液两相流的流场分布均匀,频谱稳定。当纵横比变为 1.5 和 2.0 时,流场的循环范围减小且结构形态开始遭到破坏。因此在相同实验条件下,实验装置的纵横比为 1.0 时,更有利于改进曝气效果。

2) 当曝气装置纵横比为 1.0 时,整个气液两相流的结构最为稳定,氧传质效率高;当纵横比为 1.5 时,气液两相流中部的结构和形式最不稳定性,氧传质效率开始降低;当纵横比为 2.0 时,气液两相流顶部的结构和形式最不稳定性,氧传质效率最低。

3) 当曝气装置纵横比为 1.0 时,气液两相流能形成稳定的气液环流,气泡运动到流场顶部后可跟随气液循环,沿边壁下深至底部区域,使气泡在液相中的停留时间变长,这样可以有效的改善氧传质的效率,优化曝气效果。

#### 参考文献:

- [1] 李燕飞, 孙迎雪, 田媛, 等. 曝气生物滤池处理生活污水研究[J]. 环境工程学报, 2011, 05(3): 575-578.  
Li Yanfei, Sun Yingxue, Tian Yuan, et al. Study on domestic wastewater treatment with biological aerated filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 05(3): 575-578.
- [2] 陈冬, 陶豫萍. 不同污水处理工艺对水质净化效果的比较[J]. 环境科学导刊, 2013, 27(20): 69-70.  
Chen Dong, Tao Yuping. Comparison of water quality purification effect by different wastewater treatment process[J]. Environmental Science Survey, 2013, 27(20): 69-70.
- [3] Vandu C O, Krishna R. Influence of scale on the volumetric mass transfer coefficients in bubble columns [J]. Chemical Engineering & Processing, 2004, 43(4): 575-579.
- [4] 侯和平, 郭凯铭, 刘凯, 等. 基于 Radon 变换与灰度投影积分极值方法的矩形检测[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(2): 133-138.  
Hou Heping, Guo Kaiming, Liu Kai, et al. Rectangle detection based on radon transform and gray projection integral extreme value method[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(2): 133-138.
- [5] 田道贵, 孙立成, 高菲, 等. 光学探针在气液两相流局部参数测量中的应用研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(6): 91-95.  
Tian Daogui, Sun Licheng, Gao Fei, et al. A study on application of optical probes for the measurement of local parameters in two-phase flow [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(6): 91-95.
- [6] 刘文洪, 万甜, 程文娟, 等. 基于图像二值化处理的气液两相流不稳定结构分析[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1369-1373.  
Liu Wenhong, Wan Tian, Cheng Wenjuan, et al. Analysis on steady structure of gas liquid two-phase flow in the basis of Image binarization[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1369-1373.
- [7] 王秀英. 气液两相流含气率图像检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5): 36-39.  
Wang Xiuying. Method to measure void fraction of gas-liquid two-phase flow based on imaged processing[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(5): 36-39.
- [8] 张月皓, 董峰, 许聪, 等. 气液两相流含气率超声测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2094-2101.  
Zhang Yuehao, Dong Feng, Xu Cong, et al. Ultrasonic method for gas-liquid two phase flow void fraction measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 2094-2101.
- [9] 吴云, 郭幸斐, 张宏伟, 等. 气液两相流对气升式管式 MBR 膜污染的影响[J]. 中国给水排水, 2013, 29(9): 120-124.  
Wu Yun, Guo Xingfei, Zhang Hongwei, et al. Impact of gas-liquid two-phase flow on membrance fouling in air-lift tubular MBR [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(9): 120-124.
- [10] 崔燕平, 姚秉华. SMF-MBR 工艺对 UV254 表征的有机污染物处理效果研究[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(1): 40-45.  
Cui Yanping, Yao Binghua. A study of removal efficiency of UV254 characterized organic pollutions with SMF-MBR process[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(1): 40-45.
- [11] 裴烨青, 陈东辉, 周恭明, 等. MBBR 工艺中不同曝气方式充氧效率的比较及工程应用[J]. 环境工程, 2011, 29(1): 5-9.  
Pei Yeqing, Chen Donghui, Zhou Gongming, et al. A comparison of aeration efficiency among various aeration modes for MBBR and its application[J]. Environmental Engineering, 2011, 29(1): 5-9.

(责任编辑 周蓓)