

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.010

董亮, 曾涛, 刘少北, 等. 生物倍增反应器气泡流态特性分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 67-75. (DONG Liang, ZENG Tao, LIU Shaobei, et al. PIV measurement and POD analysis of bubble flow characteristics in bio-doubling reactor[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 67-75. (in Chinese))

生物倍增反应器气泡流态特性分析

董亮, 曾涛, 刘少北, 王勇, 张长练, 何雨

(四川理工学院 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要: 利用激光粒子图像测速技术(PIV)对生物倍增反应器在7种不同进水流量下的气泡流态特性进行了测量和分析,利用特征正交分解方法对所测2个截面的气泡流场进行分解,提取流场中含能大尺度结构。结果表明,进水流量的增加导致了气泡轴向速度减小,径向速度增大,气泡附壁效应增强;不同进水流量对气泡的扰流影响程度不同,气泡流态的速度场和涡量面积分布存在差异,在特定工况下气泡流场产生了涡旋。上部区域进水流量为0时,1阶模态占能比例最高,约为7.2%;下部区域进水流量为 $0.18\text{ m}^3/\text{h}$ 时,1阶模态占能比例最高,约为4.5%。低阶特征模态中存在明显的大尺度结构,且大尺度的流动结构与液相混合行为间接相关。当进水流量为 $0.90\text{ m}^3/\text{h}$ 时,2个截面的涡量面积分布最均匀,气泡死区最少,此时气泡流态最佳。在本试验条件下,进水流量为 $0.90\text{ m}^3/\text{h}$ 时,反应器整体气泡流态最佳。

关键词: 粒子图像测速技术; 生物倍增反应器; 特征正交分解; 流量; 气泡流态; 附壁效应

中图分类号: X703.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)04-0067-09

生物倍增反应器(即生物倍增工艺BOD)是一种以循环流动为主要特点,将生化区和澄清区合建在同一构筑物中,集曝气、沉淀、泥水分离和污泥回流功能于一身的活性污泥反应器^[1-2]。何文杰等^[1]做了生物倍增工艺同步脱氮除磷强化途径分析,结果表明,有机污染物去除效果显著,氨氮去除率可达100%。秦臻^[2]对生物倍增技术处理高氨氮高浓度化纤废水——己内酰胺废水做了较为系统的研究,结果表明,COD去除率大于98%,氨氮去除率大于99%,采用专利微孔曝气软管可将氧传递效率提高1倍,且大表面积曝气比常规曝气方式要均匀得多。这些研究成果较好地揭示了小试和中试状态下生物倍增反应器的污水处理性能,但都未对生物倍增反应器进行气泡流态特性的研究;且生物倍增反应器进水段承担对高浓度进水和回流混合液进行快速高倍均匀稀释的功能,进水对气泡流态的影响将会改变进水段气液传质能力,因此研究进水段气泡流态有助于提高生物倍增反应器的废水处理效率。

近些年来,液相中气泡的生成、发展演化过程一直是流体与相关多相流领域的研究热点。肖柏青等^[3]利用针式浓度仪对曝气池气泡羽流附壁效应^[4](也称为Coanda效应)进行了试验研究,结果表明,气泡羽流倾斜角度受控于盘壁距离和通气量,与水深没有明显关系。Di Marco等^[5]利用高速摄像系统对不同尺寸氮气泡在静止化学液体中的上升速度进行了试验比较研究。许联锋等^[6]利用PIV技术对静止水体中的气泡运动速度场进行了模型试验分析。晟玮等^[7]利用PIV对半径为 $20\sim 320\text{ }\mu\text{m}$ 气泡的上浮速度进行了测量。Rabha等^[8]对单个气泡和群气泡在剪切液体中的上升运动特性以及浮力在高黏性液体和低黏性液体中对气泡运动的影响作用进行了数值模拟研究。这些研究成果较好地揭示了静止液体中气泡产生发展演化过程及

收稿日期: 2016-07-29

基金项目: 四川省科技支撑计划资助项目(2014GZ0132);自贡市科技局重点项目(2013X12,2016SF02);四川理工学院创新基金项目(y2016011)

作者简介: 董亮(1987—),男,四川攀枝花人,硕士研究生,主要从事水处理反应器多相流测试与模拟研究。

E-mail:449553637@qq.com 通信作者:曾涛(E-mail:396109721@qq.com)

流态特性,但都未对不同进水流量下气液两相流中气泡流态特性进行研究。

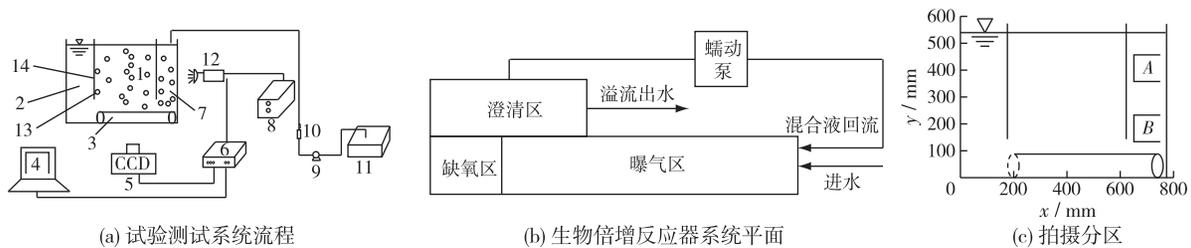
粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)广泛应用于气液两相流流场测量中^[6-7,9]。特征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)方法能够有效地对PIV得到的速度矢量场进行提取与分析^[10]。研究证明通过POD方法可以从原始流场分解出物理上有意义的全序列流场结构,为利用POD方法分析曝气池气泡的流场结构,特别是进水对气泡流态的影响指明了方向。

本文基于PIV试验技术对生物倍增反应器进水段不同进水流量对气泡流态特性的影响进行测试,同时使用特征正交分解POD方法对涡量场进行分析,得到气泡涡结构,将流场中的相干结构与其包含的能量相结合,为进一步了解气泡特性,特别是不同进水流量对气泡流态特性的影响关系提供了新的视角。

1 试验装置和方法

1.1 试验系统介绍

生物倍增反应器试验测试系统的流程如图1(a)所示,该系统主要由生物倍增反应器、进出水系统(进水管高于自由液面400 mm,垂直于正中心)、激光系统、CCD摄像系统和图像处理系统等部分组成。生物倍增反应器由曝气区、缺氧区和澄清区串联而成,曝气区进水段单独设计为1个格室,缺氧区溢流进澄清区,再通过蠕动泵将沉淀的混合液回流进曝气区,实现好氧-缺氧一体化的功能,如图1(a)和(b)所示。反应器为长方形的透明玻璃体,结构尺寸0.775 m×0.120 m×0.570 m,总容积74 L(澄清区容积为20 L),两个隔板缝隙(即与微孔曝气软管的距离)高度均为0.160 m。微孔曝气软管长约0.560 m,管外径66 mm,内径49 mm,平均孔径80~100 μm。试验中PIV系统使用丹麦Dantec Dynamics A/S公司生产的PIV系统,图像像素为2 048×2 048,采样频率16 帧/s。



1.生物倍增反应器 2.缺氧区 3.微孔曝气软管 4.计算机 5. CCD相机 6.同步器
7.反应器第一格室 8.激光电源 9.进水泵 10.进水流量计 11.进水箱 12.激光器 13.气泡 14.隔板

图1 生物倍增反应器试验测试系统

Fig.1 Bio-doubling reactor experimental testing system

1.2 试验方案

试验进水采用去离子水,进水流量分别为0(反应器只曝气无进水),0.09,0.18,0.36,0.54,0.72和0.90 m³/h,曝气强度固定为0.81 m³/h。试验中PIV激光光源从反应器的右侧进入,如图1(a)所示,CCD相机放置在反应器正面,垂直于激光片光源方向。反应器试验有效容积44 L,即有效水深0.54 m。本次试验中所产生的气泡半径均在1 000 μm以下,研究气泡运动特性时,示踪粒子就是气泡本身^[6,11],故未投加气泡示踪粒子。试验进水管高于自由液面400 mm,进水对上升气液的冲击强度较大,自由液面区域气泡破碎和重叠严重不利于拍摄,故试验中PIV系统的流场测量区域在保证获得较高分辨率的前提下,拍摄区域选择上部区域A(长×宽×高=115 mm×120 mm×86 mm)和下部区域B(长×宽×高=115 mm×120 mm×86 mm),如图1(c)所示,且拍摄断面在反应器宽度中心轴线上。试验中依次对同种工况下两个截面进行拍摄,每组试验采集70对PIV图像。

2 试验结果分析

2.1 生物倍增反应器上部区域 A 的气泡流动特征

图2给出了反应器上部区域在进水流量为0~0.90 m³/h共7种不同流量工况下,上部区域A气泡轴向、径向平均速度和平均涡量随进水流量变化的曲线。从图2(a)可以看出,气泡轴向平均速度随进水流量的增加呈逐渐下降趋势;气泡径向平均速度随进水流量的增加呈先上升后逐渐平缓的趋势;从图2(b)可以看出,气泡平均涡量随进水流量的增加呈上升→下降→上升→下降的趋势。当反应器进水流量为0时,气泡轴向平均速度达到峰值0.359 1 m/s,说明此时气泡上升速度最快;气泡径向平均速度达到最小值-0.000 562 43 m/s(绝对值接近于0),说明此时气泡摆动和振动最小,呈垂直上升状态,气泡倾斜角度最小,故气泡附壁效应最弱^[3],气泡在水中的停留时间最短;气泡平均涡量达到最小值23.695 6 s⁻¹,气泡与气泡的碰撞较小。进水流量为0.90 m³/h时,气泡轴向平均速度达到最小值0.161 0 m/s,说明大量进水减缓了气泡的上升速度(冲碎气泡或随进水向下流动),此时气泡在水中的停留时间最长,有助于提高体液中的溶解氧;气泡径向平均速度达到第2峰值0.026 2 m/s,气泡摆动和振动较剧烈,此时气泡羽流较复杂^[12],复杂的气泡羽流更有助于氧的转移和液相混合^[13]。当反应器进水流量为0.36 m³/h时,气泡径向平均速度和平均涡量均达到峰值0.041 3 m/s和0.359 1/s,说明此时气泡摆动、振动和碰撞最剧烈,气泡附壁效应最强。分析其原因为,上部区域A靠近进水口,随着进水流量的增加,即进水流速和动能增加,进水和上升气液发生剧烈撞击,部分气泡被撞碎,部分气泡随进水向下移动,直至被卷吸进左右边壁的流场中,部分气泡在固定位置形成循环涡旋;当进水流速较慢时,进水无法冲碎气泡,气泡也无法形成涡旋结构,也无法使气泡下降较长距离,临界位置会形成大量气泡“堆积”现象,使气泡与气泡之间的碰撞和振动加剧。

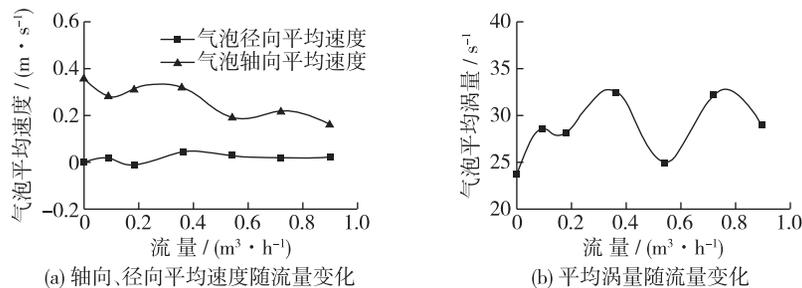


图2 A区气泡轴向、径向平均速度和平均涡量随进水流量变化

Fig. 2 Changes of axial, radial mean velocity and mean vorticity of bubbles with inflow discharge to reactor

从图2选出进水流量为0,0.36和0.90 m³/h时上部区域气泡流动特征来分析。进水流量为0时气泡流动特征如图3(a)~(c)所示,可见:该工况下,峰值速度出现在A区域的右边壁和中心区域,且高速区面积较小;低速区分布左边壁附近,且低速区面积较大,速度梯度较大;流线整体呈竖直状态,说明气泡附壁效应较弱;没有涡旋结构,气泡快速溢出装置,停留时间很短;涡量较小且集中在A区域的中间和右边壁区。

进水流量为0.36 m³/h时气泡流动特征如图3(d)~(f)所示,可见:该工况下,峰值速度出现在A区域的右边壁和中心区,且高速区面积较小;低速区分布左边壁附近,且低速区面积较大;流线整体呈向右倾斜状态,对比图3可见流线倾斜角度最大,说明此时气泡附壁效应最强,气泡聚集和碰撞加剧,且相比流量为0时气泡停留时间缩短;涡量强度最大但集中在A区域的右边壁区,涡量强度值的梯度较大。

进水流量为0.90 m³/h时气泡流动特征如图3(g)~(i)所示,可见:该工况下,峰值速度出现在A区中心,且高速区面积较小;低速区分布左边壁附近,且低速区面积较大;左边壁流线整体呈向左倾斜状态,可见明显向左的附壁效应,中下部流线区域(即X=70~90 mm,Y=0~60 mm)形成旋流,此时气泡流场中,部分气泡溢出装置,部分气泡进入右侧稳定的涡旋结构,停留时间增大,气泡运动的方向也迅速发生改变,右边流线呈向右倾斜状态,可见明显向右的附壁效应;涡量较大且集中在A区域的右边壁和中间大部分区域。进水

0.90 m³/h 工况和 0.36 m³/h 工况相比,气泡停留时间最长,有助于氧的转移,进而降低进水段高负荷,气泡羽流复杂,复杂的气泡羽流更有助于液相快速均匀混合;涡量面积分布最均匀,说明该区域气泡死区较少,有利于气液和进水的充分混合,提高了该区域的容积利用率、废水处理效率和高浓度进水的稀释速率。在本试验条件下,当反应器在进水流量为 0.90 m³/h 时上部区域 A 气泡流态最佳。

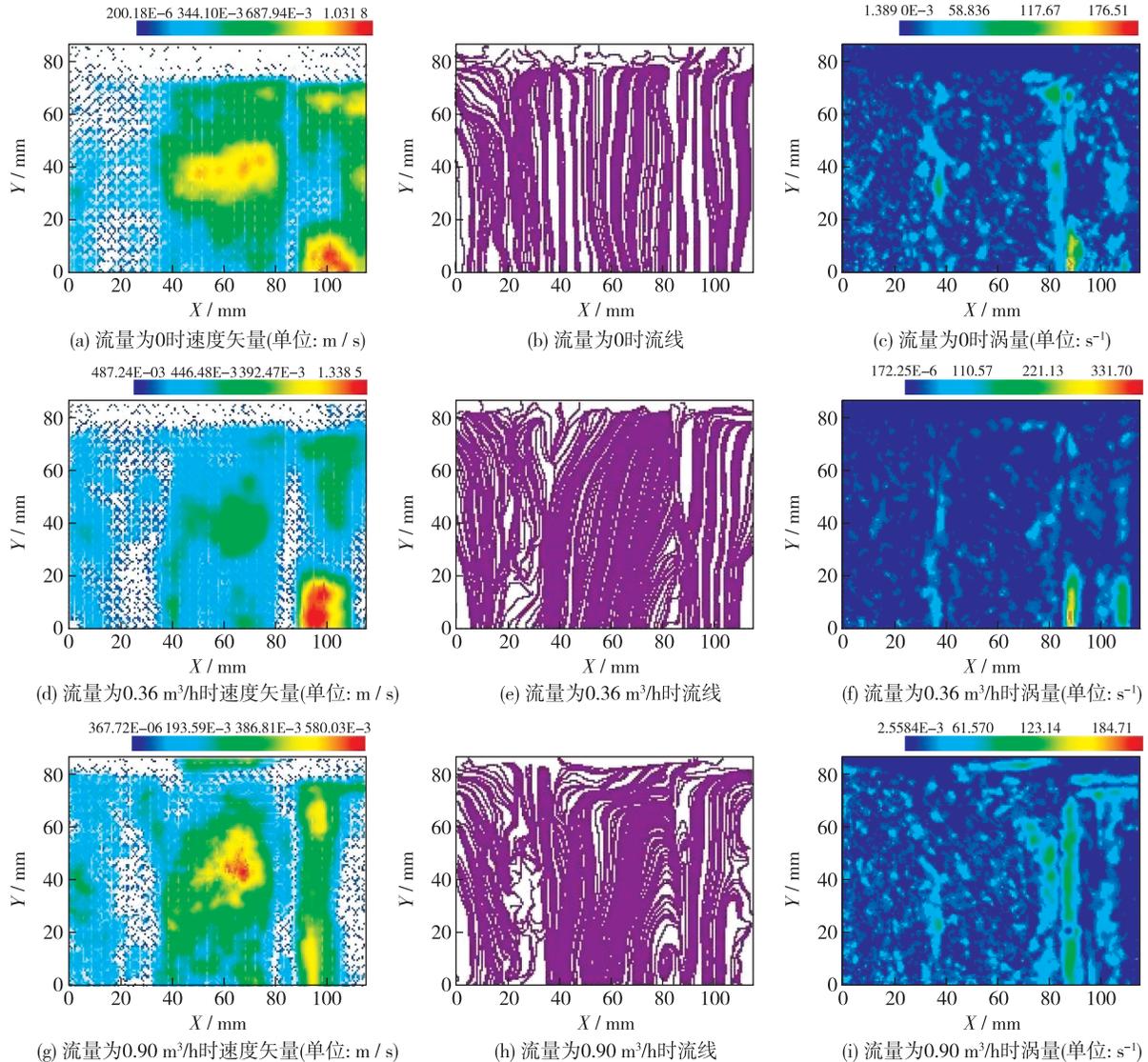


图3 反应器上部区域3种不同进水流量条件下的气泡流动特征

Fig. 3 Characteristics of gas flow in upper part of reactor under three different flow conditions

2.2 生物倍增反应器在下部区域 B 气泡流动特征

图4给出了反应器下部区域在进水流量为0~0.90 m³/h共7种不同流量的工况下,下部区域B气泡轴向、径向平均速度和平均涡量随进水流量变化的曲线。从图4(a)可见,气泡轴向平均速度随进水流量的增加呈逐渐下降趋势;气泡径向平均速度随进水流量的增加几乎不变,说明进水流量的增加对气泡倾斜角度影响较小,气泡附壁效应变化不大且较弱。从图4(b)可见,气泡平均涡量随进水流量的增加呈先降后升的趋势。当反应器进水流量为0时,气泡轴向平均速度达到峰值0.3675 m/s,说明此时气泡上升速度最快,呈垂直上升状态。进水流量0.90 m³/h时,气泡轴向平均速度达到最小值0.2376 m/s,说明大量进水减缓了气泡上升速度或气泡随进水向下移动,使气泡停留时间延长,有助于提高液体中的溶解氧;径向平均速度达到

峰值 0.0029 m/s (绝对值最远离0),说明此时气泡摆动和振动最剧烈,气泡附壁效应最强;平均涡量达到峰值 $49.7469/\text{s}$,说明此时气液混合程度最好。分析其原因,进水与上升气液对冲后,动能急剧下降,对气泡的撞击和扰动减弱;当进水流量达到一定临界点时,进水能快速到达下部区域B,对气泡的冲击较强,改变气泡流态,气泡与气泡之间的碰撞加剧。

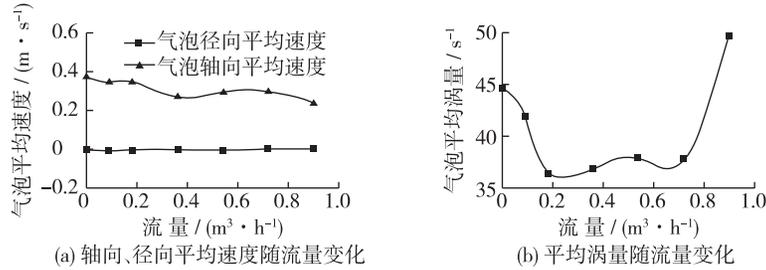


图4 B区气泡轴向、径向平均速度和平均涡量随进水流量变化

Fig. 4 Changes of axial, radial mean velocity and mean vorticity of bubbles with inflow discharge

从图4选出进水流量为 $0, 0.36$ 和 $0.90 \text{ m}^3/\text{h}$ 时下部区域B气泡流动特征(见图5)来分析。

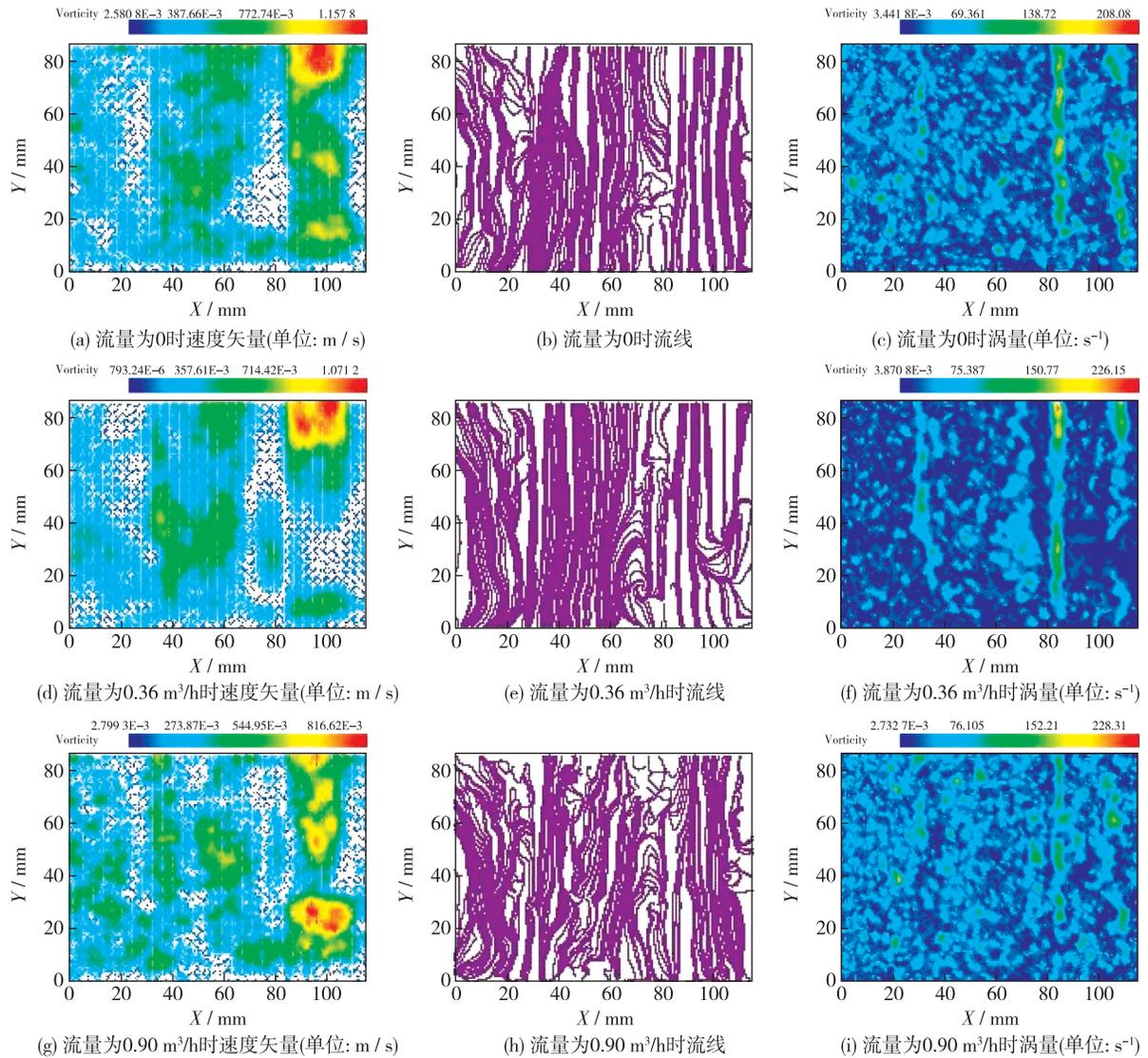


图5 反应器下部区域3种不同进水流量条件下的气相流动特征

Fig. 5 Characteristics of gas flow in lower part of reactor under three different flow conditions

进水流量为0时气泡流动特征如图5(a)~(c)所示,可见:该工况下,峰值速度出现在B区域的右边壁区,且高速区面积较小;低速区分布左边壁附近,且低速区面积较大;流线整体呈竖直状态,左边流线呈向左倾斜状态,附壁效应较弱;涡量较大且分布均匀。气泡流场中,涡旋结构较小,气泡停留时间较短。

进水流量为 $0.36\text{ m}^3/\text{h}$ 时气泡流动特征如图5(d)~(f)所示,可见:该工况下,峰值速度出现在B区域右边壁上部区域,且高速区面积较小;低速区分布在左边壁附近,且低速区面积较大;流线左边呈竖直状态,气泡附壁效应较弱,右边形成涡旋结构,使气泡停留时间延长;涡量较小且集中在进水垂直区域。

进水流量为 $0.90\text{ m}^3/\text{h}$ 时气泡流动特征如图5(g)~(i)所示,可见:该工况下,峰值速度出现在B区域的右边壁区,且高速区面积较小;低速区分布左边壁附近,且低速区面积较大;流线部分呈竖直状态,部分呈旋转状态,流线下部区域(即 $x=70\sim 90\text{ mm}$)形成涡旋结构,流线中部和右边的顶部呈向右倾斜状态;涡量强度达到峰值且分布最均匀。对比图3和5可见,上部区域A的气泡流线倾斜角度大于下部区域B,说明当进水流量增加,气泡附壁效应随反应器深度的增加而减弱,但不明显,这与文献[4]的结论吻合。进水 $0.90\text{ m}^3/\text{h}$ 工况和 $0, 0.36\text{ m}^3/\text{h}$ 工况相比,气泡停留时间最大,有助于氧的转移进而降低局部负荷;气泡附壁效应较弱;涡量面积分布最均匀,说明该区域气泡死区较少,有利于气液和进水的充分混合。在本试验条件下,当反应器在进水流量为 $0.90\text{ m}^3/\text{h}$ 时下部区域B气泡流态最佳。

2.3 气泡流场 POD 分析

特征正交分解(POD)基于主元分析(PCA)思想,根据 Karhunen-loève 展开将流场进行分解,按能量比计算出各阶模态,识别流动中的大尺度能级结构。POD 之于 PIV 相当于 LES 之于 CFD,POD 对流动系统的识别旨在获得多维度系统的低维度近似描述,准确把握住主导的流动结构,对复杂流动进行合理的降阶研究。特征正交分解已被广泛用于各种湍流速度场、涡量场、压力场等的研究中^[14-15]。本试验采用由 Sirovich 提出的快照 POD 法(snapshot POD)^[16],将速度场分解为均速度场和脉动速度场,即 $u(x)=\bar{u}+u'(x)$,然后再对脉动速度场进行特征正交分解,全部流动信息分解为时均流动(0阶模态)与脉动流动(分解为 $1, 2, \dots, n$ 阶模态)。A和B区域所有进水流量下气泡流场前10阶模态(不含0阶模态)情况为:上部区域A,进水流量0工况下,1阶模态能量最高占7.2%,其他1阶模态占比均在6%以下;7种动能比下2阶模态能量约占3%~5%。下部区域B,进水流量 $0.18\text{ m}^3/\text{h}$ 工况下,1阶模态能量最高占4.5%,而其他1阶模态所占比均在4.5%以下,7种动能比下2阶模态能量约占2%~3.5%。两个区域的高阶模态对总动能贡献更低,较高阶模态含着小尺度的复杂结构流动信息。

对A和B区域7种不同进水流量下的全流场进行POD分析,得到各自POD模态。因8个测次低阶模态结构相似,故仅给出A区域流量为0和 $0.09\text{ m}^3/\text{h}$ 和B区域流量 $0, 0.09, 0.18$ 和 $0.36\text{ m}^3/\text{h}$ 工况下的涡量图。图6给出了A区域进水流量为0和 $0.09\text{ m}^3/\text{h}$ 时1~4阶模态流动相干结构的涡量,图6(a)~(d)中可清晰观察到流场中(右上角)存在大尺度涡结构,这里的大尺度涡结构与大多数文献^[17-18]里“大尺度涡结构”不同,并非指很大的面积,而是指相对下一阶涡结构面积较大或面积分布较大;随特征模态阶数升高,大尺度涡结构逐渐消散为小尺度涡旋结构,且涡量面积分布减小。图6(e)~(h)中可清晰观察到流场中在4阶模态时,大尺度涡旋结构消散为较小尺度涡旋结构,且涡量面积分布减小。

图7分别给出了B区域进水流量为 $0, 0.09, 0.18$ 和 $0.36\text{ m}^3/\text{h}$ 工况下的1~2阶模态流动相干结构的涡量。从图7中,可清晰观察到各个流场随特征模态阶数升高,大尺度涡结构逐渐消散为小尺度涡旋结构,且涡量面积分布减小。

从图6和7可见,大尺度涡结构主要位于反应器的进水垂直冲击区,若能控制好进水流量与上升气液对冲的气泡流态结构,使A和B区域包含更多大尺度结构和面积分布均匀,将有利于冲击气液能量的输运性能的整体提高,更有利于液相快速有效混合。大尺度序列结构与撞击流的气液碰撞行为直接相关,与液相混合行为间接相关,流场中序列结构尺度越大,能量越大,间接使液相越有利于均匀混合。瞬时流场的1阶模态含能比例越大,达到均匀混合的时间越短^[19]。因此,本次试验条件下,进水流量 $0.09\text{ m}^3/\text{h}$ 时,A区域液体均匀混合时间最短;进水流量 $0.18\text{ m}^3/\text{h}$ 时,B区域液体均匀混合时间最短;但A和B区域各工况的1阶模

态含能比例相差不大,因此,进水流量 $0.90 \text{ m}^3/\text{h}$ 工况与其他进水流量工况的液体均匀混合时间差别较小。

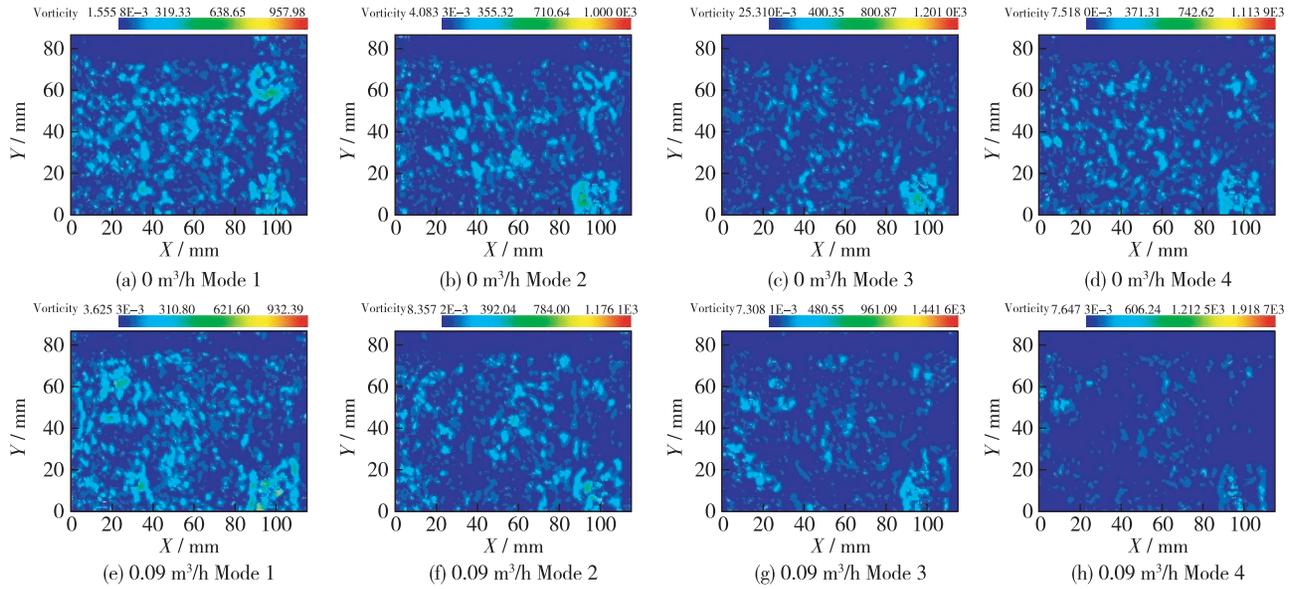


图6 A区域不同流量前4阶模态(单位: s^{-1})

Fig. 6 First four spatial modes of different influent flow rates in A region (unit: s^{-1})

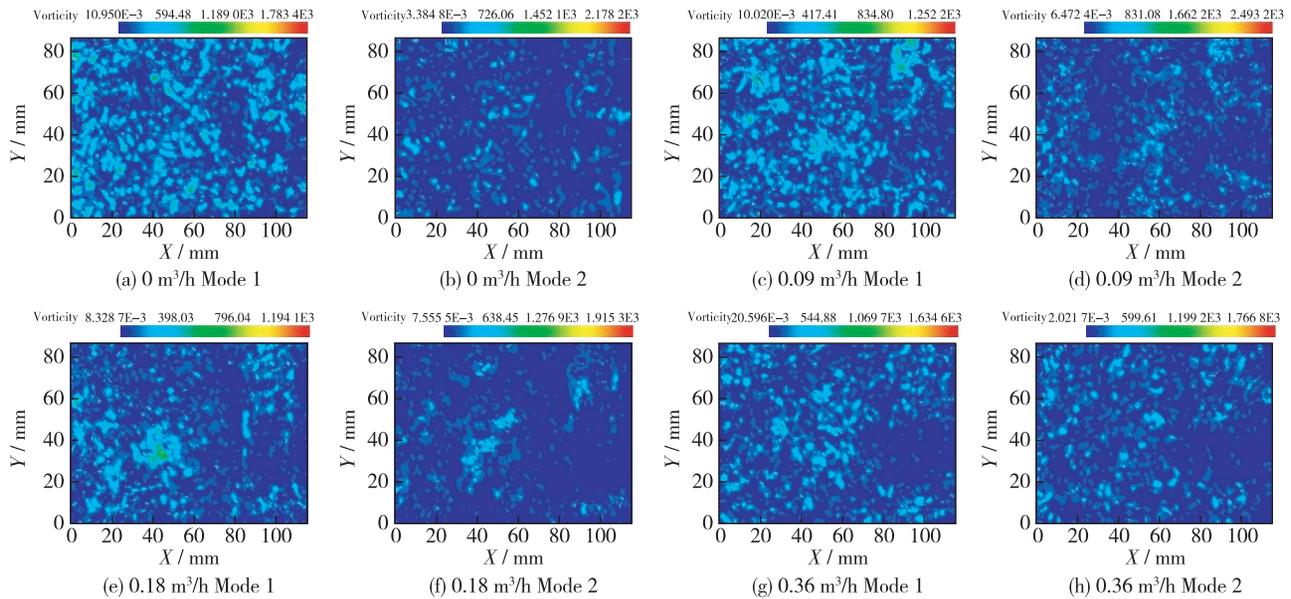


图7 B区域不同流量前2阶模态(单位: s^{-1})

Fig. 7 First two spatial modes of different inflow discharge in B region (unit: s^{-1})

综上所述,当进水流量为 $0.90 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,反应器两个截面的涡量面积分布最均匀,气泡死区最少,气泡附着效应较弱,此时气液和进水混合程度最好,良好的混合流态有助于减少死区,提高了反应器的氧传质能力、容积利用率、废水处理效率和进水稀释速率。本试验条件下,当进水流量为 $0.90 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,生物倍增反应器进水段整体气泡流态最佳。

3 结 语

(1)反应器上下区域的气泡速度均以轴向速度为主,且有明显的分布规律,两个区域的轴向速度均随进水流量的增加呈逐渐下降趋势;径向速度比较小,均随进水流量的增加呈逐渐上升趋势,但分布平缓。涡量强度较大,且分布比较复杂。上部区域的气泡倾斜角度大于下部区域,即随着进水流量的增加,气泡附壁效应随反应器深度的增加而减弱,但不明显。

(2)不同进水流量工况下气泡流态低阶特征模态中存在明显的相干结构,且大尺度流动结构与流场中绝大部分的能量分布直接相关,而高阶特征模态代表了流动的小尺度结构。A区域在进水流量为0时,1阶模态能量最高占7.2%,2阶模态能量约占3%~5%;B区域在进水流量为0.18 m³/h时,1阶模态能量最高占4.5%,2阶模态能量约占2%~3.5%;A和B区域各工况1阶模态的含能比例相差不大。

(3)本试验条件下,反应器进水段整体最佳气相流态确定在进水流量为0.90 m³/h时,在此进水流量下对应着一个比较优化的气泡速度、涡量值和气泡流态。

参 考 文 献:

- [1] 何文杰,周成金,张甜甜,等.生物倍增工艺同步脱氮除磷强化途径分析[J].环境工程学报,2012,6(11):4136-4140. (HE Wenjie, ZHOU Chengjin, ZHANG Tiantian, et al. Improvement approaches of simultaneous nitrogen and phosphorous removal in bio-doubling process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(11): 4136-4140. (in Chinese))
- [2] 秦臻.生物倍增技术处理高氨氮高浓度化纤废水-己内酰胺废水中试试验研究[D].西安:长安大学,2006:1-72. (QIN Zhen. Bio-doubling technology method used in high concentrated organic ammonia nitrogen compound wastewater-caprolactan wastewater treatment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006: 1-72. (in Chinese))
- [3] 肖柏青,张法星,刘春艳,等.曝气池内气泡羽流附壁效应的试验研究[J].水力发电学报,2012,31(4):104-112. (XIAO Baiqing, ZHANG Faxing, LIU Chunyan, et al. Coanda effect of bubble plume in aeration tanks [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 104-112. (in Chinese))
- [4] FREIRE A P S, MIRANDA D D E, LUZ L M S, et al. Bubble plumes and the Coanda effect[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28: 1293-1310.
- [5] MACRO P D, GRASSI W, MEMOLI G. Experimental study on rising velocity of nitrogen bubbles in FC-72[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42(5): 435-446.
- [6] 许联锋,陈刚,李建中,等.气液两相流中气泡运动速度场的PIV分析与研究[J].实验力学,2002,17(4):458-463. (XU Lianfeng, CHEN Gang, LI Jianzhong, et al. PIV measurement for bubble velocity in gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(4): 458-463. (in Chinese))
- [7] 石晟玮,王江安,蒋兴舟.基于粒子成像测速技术的微气泡运动实验[J].测试技术学报,2008,22(4):346-349. (SHI Shengwei, WANG Jiang'an, JIANG Xingzhou. Experimental study of micro-bubble rising based on PIV[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(4): 346-349. (in Chinese))
- [8] RABHA S, BUWA V. Volume-of-fluid (VOF) simulations of rise of single/multiple bubbles in sheared liquids[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(1): 527-537.
- [9] KOSIWCCZUK 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: 895-908.
- [10] LINÉ A, GABELLE J C, MORCHAIN J, et al. On POD analysis of PIV measurement applied to mixing in a stirred vessel with a shear thinning fluid[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(11): 2073-2083.
- [11] PAFFEL M, WILLER C, KOMPENHANS J. Particle image velocimetry: a practical guide[M]. New York: Springer, 1998.
- [12] 宋策,程文,胡保卫,等.气泡羽流空隙率的计算及其不稳定规律的研究[J].水利学报,2011,42(4):419-424. (SONG Ce, CHENG Wen, HU Baowei, et al. Research on the calculation of void fraction of bubble plume and its instability pattern[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 419-424. (in Chinese))
- [13] 肖柏青,张法星,戎贵文.曝气池气泡羽流数值模拟及氧转移影响[J].环境工程学报,2014,8(11):4581-4585. (XIAO Baiqing, ZHANG Faxing, RONG Guiwen. Numerical simulation and oxygen transfer effect of bubble plume in aeration

- tanks[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11): 4581-4585. (in Chinese))
- [14] SHI Liuliu, LIU Yingzheng, WAN Jinjin. Influence of wall proximity on characteristics of wake behind a square cylinder: PIV measurements and POD analysis[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(1): 28-36.
- [15] O'DONNELL B J, HELENBROOK B T. Proper orthogonal decomposition and incompressible flow: an application to particle modeling[J]. Computers and Fluids, 2007, 36(7): 1174-1186.
- [16] SIROVICH L. Turbulence and the dynamics of coherent structures [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1987, 45(3): 561-590.
- [17] 孙姣, 张宾, 唐湛棋, 等. 旋转圆柱绕流的 PIV 实验研究[J]. 实验流体力学, 2016, 30(1): 81-90. (SUN Jiao, ZHANG Bin, TANG Zhanqi, et al. Experimental study on the flow past a rotating cylinder with PIV[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(1): 81-90. (in Chinese))
- [18] 蔡伟华, 李凤臣, 张红娜, 等. 减阻水溶液槽道湍流特性 POD 分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(7): 51-57. (CAI Weihua, LI Fengchen, ZHANG Hongna, et al. POD analysis for the turbulent characteristics of channel flow with drag-reducing aqueous solution[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(7): 51-57. (in Chinese))
- [19] 张建伟, 张学良, 冯颖, 等. 水平对置撞击流的 POD 分析及混合特性[J]. 过程工程学报, 2016, 16(1): 26-33. (ZHANG Jianwei, ZHANG Xueliang, FENG Ying, et al. POD analysis and mixing characteristics of impinging streams from two opposite nozzles[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(1): 26-33. (in Chinese))

PIV measurement and POD analysis of bubble flow characteristics in bio-doubling reactor

DONG Liang, ZENG Tao, LIU Shaobei, WANG Yong, ZHANG Changlian, HE Yu

(Key Laboratory in Sichuan Colleges on Industry Process Equipments and Control Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: The characteristics of bubble flow in gas-liquid two phase flow in the bio-doubling reactor under seven different inlet flow rates were investigated by using particle image velocimetry (PIV) technology. The bubble flow field in the two cross-sections of the reactor was decomposed further using proper orthogonal decomposition analysis for extracting the large scale structure of the flow. The analysis results show that the axial velocity decreases, the radial velocity increases and the Coanda effect is enhanced with the increase of the influent flow rate. As the influences of different inflow discharges on the bubble flow are different, so that there are differences between the velocity field and vorticity distribution of the bubble flow, and the vortex occurs in the bubble flow field and the bubble flow field produces vortex flow under a specific working condition. When the inflow discharge in the upper region(A) is 0, the highest energy content of the first order modes is about 7.2% of the total kinetic energy, and when the inflow discharge in the lower area(B) is 0.18 m³/h, the highest energy content of the first order modes is about 4.5% of the total kinetic energy. The proportion of the first order mode is not quite different in the A and B regions. There are obvious large scale structures in the low order characteristic modes, and the large scale flow structure is indirectly related to the liquid mixing behavior. When the inflow discharge is 0.90 m³/h, the area of two cross sections of the reactor is the most uniform and the gas phase dead zone is the least, and at this time, the flow regime is the best. Under such experimental conditions, when the inflow discharge is 0.90 m³/h, the overall bubble flow regime of the reactor is the best.

Key words: particle image velocimetry technology; bio-doubling reactor; proper orthogonal decomposition; flow discharge; bubble flow regime; Coanda effect