

交错气泡运动特性数值模拟研究

王乐¹, 樊敏², 詹翔宇¹, 杨顺生¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为了进一步探讨交错气泡运动变形特征及运动过程, 采用 OpenFOAM 开源计算流体力学软件, 利用 VOF 方法, 对三维两气泡在不同间距及偏移距离时的上升运动行为进行模拟, 研究气泡间距及偏移距离对流场、速度场及气泡形态等的影响。结果表明: 在两气泡运动至聚并为一个气泡前, 两气泡两侧存在 4 个大小不一的旋涡, 下气泡左侧旋涡影响范围较小; 两气泡聚并为一个气泡后, 该一个气泡两侧形成 2 个大旋涡并随着偏移距离增大, 左侧旋涡影响的范围也越大。两气泡的间距及偏移距离影响着气泡上升及聚并过程中的气泡形态。气泡间距一定时, 下方气泡偏移距离越大, 两个气泡顶部速度增幅越小。

关键词: 交错气泡; 气泡运动; 双气泡; 运动特性; 数值模拟; VOF 方法; CSF

中图分类号: TV131.4; O35

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0142-08

Numerical simulation of staggered bubble motion characteristics

WANG Le¹, FAN Min², ZHAN Xiangyu¹, YANG Shunsheng¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to further study the motion characteristics and motion process of staggered bubbles, the VOF (volume of fluid) method in the OpenFOAM open source fluid dynamics software was used to simulate the double bubble rising behavior at different spaces and off-set distances under 3-D conditions. The effects of double bubble space and off-set distance on flow field, velocity field, and bubble morphology were analyzed. The results shown that four swirls with different sizes existed at two sides of two bubbles before the two bubbles moved and coalesced into one, and the swirl on the left of the lower bubble had a small influential range. Whereas both sides of which two big swirls formed and increased with off-set distance and the influential range of the left swirl increased, after two bubbles coalesced into one. The space and off-set distance of two bubbles affected their morphology during their rising behavior and coalescence. The off-set distance of the lower bubble increased, and the increment of their top velocity decreased for a constant bubble distance.

Key words: staggered bubble; bubble motion; double bubble; motion characteristics; numerical simulation; volume of fluid method (VOF); continuum surface force (CSF)

1 研究背景

曝气过程中气泡羽流广泛地存在于氧化沟、曝气生物滤池等曝气构筑物中。针对上浮过程的气泡运动行为的基础研究, 对于进一步解释曝气过程的气泡运动机理有着重要意义。气泡在液体中的运动

受到浮力、曳力等多种作用力的影响, 其运动行为复杂且不稳定。众多学者对气泡的运动行为研究主要采用了实验^[1-2]及数值模拟^[3-4]等技术手段。其中, 数值模拟由于经济性好且能够获取到更多地气泡动力学信息, 越来越多的被应用到气泡运动的研究中。

收稿日期: 2017-06-06; 修回日期: 2017-06-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41601088)

作者简介: 王乐(1986-), 男, 陕西西安人, 在读博士研究生, 研究方向为环境多相数值模拟研究。

通讯作者: 杨顺生(1961-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 研究方向为污泥资源化。

在数值模拟技术中,对于气泡的模拟采用的模型主要有 VOF 方法(volume of fluid method)、LBM 方法(lattice boltzmann method)、FTM 方法(front tracking method)以及 Level set 方法等。FTM 方法模拟得到的计算结果较为精确,但由于算法的复杂性及计算效率较低等缺点未能广泛应用。而 Level set 方法由于根据界面距离函数完成两相界面跟踪,使得该方法往往在应用过程中缺乏流体守恒性。VOF 方法能够保证计算过程中的体积守恒,物理意义清晰明确,适用于不同网格结构,被较多地用于气泡的数值模拟研究^[5-8]。

目前针对气泡运动的数值模拟研究主要基于以下两点:(1)数值方法及其改进,包括了表面张力处理方法^[9]、数值方法^[10-11]、高精度格式^[12]等。(2)应用研究,包括了物理模型差异^[13]、气泡物理属性的变化^[7,14]、液相性质的差异^[8]等,且多集中于在线双气泡以及同轴气泡的研究。其中,Ryu 等^[5]对数值模拟过程中将 LBM 和 VOF 方法进行对比,分别验证了单气泡以及两气泡的气泡运动行为,发现在对两气泡尤其是偏移两气泡的研究中 VOF 方法更加精确且与实验结果吻合较好。Liu Jingru 等^[15]对非牛顿流体下的多气泡运动行为进行了实验研究并与数值模拟进行对比,发现气泡的运动行为与牛顿流体下有着一定差异,多个水平气泡能否发生聚并很大程度上取决于气泡间的初始间距和气泡初始大小。

Ganesan 等^[13]采用数值模拟方法对计算域不为矩形,而为梯形时单个气泡运动特性的变化进行研究,发现气泡上升速度随着梯形倾斜度的增加而降低。Ma Dou 等^[14]在二维条件下,对单个气泡的生成运动行为进行数值模拟,并探讨密度、表面张力等物理属性对气泡生成的影响。蒋昌波等^[7]对不同尺度水平并列气泡运动特性进行了三维数值模拟,探讨气泡形变特征及射流产生与发展的真实物理过程。杜煜昊等^[10]对水平布置等直径气泡上升运动的数值模拟分析显示双气泡的终极速度比单气泡小。

在实际的曝气过程中,气泡多为交错分布,气泡上升运动过程较为复杂。目前的研究集中于气泡位置为同轴或在线时的气泡上浮运动行为研究,缺少两气泡在一定偏移距离下交错分布时的气泡运动特性的研究。

本文采用 OpenFOAM 开源流体力学计算软件,对不同间距以及不同偏移距离下两气泡的运动行为进行了数值模拟,分析气泡的流场、速度场以及形态等流体动力学性质。

2 数学模型

质量守恒方程:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot (2\mu D) - \nabla p + \rho g + F \quad (2)$$

式中: u 为流体的速度场, m/s; μ 为两相的混合平均动力黏度, Pa·s; ρ 为两相的混合平均密度, m³/kg; p 为压强, Pa; F 为表面张力, N; g 为重力加速度, 9.8 m/s²; D 为应变张量, 表示为:

$$D_{i,j} = \frac{1}{2}(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) \quad (3)$$

流体体积输运方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \cdot \nabla \varphi = 0 \quad (4)$$

式中: φ 为流体体积函数。两相的混合平均密度及动力黏度由公式(5)及公式(6)给出:

$$\rho = \rho_1 \varphi + \rho_2 (1 - \varphi) \quad (5)$$

$$\mu = \mu_1 \varphi + \mu_2 (1 - \varphi) \quad (6)$$

表面张力 F 的计算采用了连续表面张力(CSF)模型,该模型将表面张力转化为体积力进行计算,具体的模型公式见文献[16]。

3 模型及计算方法

3.1 模型及网格划分

图1所示为计算的物理模型及网格划分,其中图1(a)为立方体的计算模型,其长宽高分别0.04、0.04和0.08 m,图1(b)为底面以及两侧壁面的网格划分,采用与文献[17]一致的六面体结构化网格划分方式,该网格能够准确地模拟气泡的运动行为,其中 x 方向网格数量为80, y 方向网格数量为80, z 方向网格数量为160,网格总数量为102 400。

3.2 计算方法及边界条件

采用有限体积法对第2章节的方程进行离散,速度和压力的解耦采用 PISO 算法。体积分数的对流项采用 Gauss Vanleer 格式,人工压缩项采用 Gauss interface Compression 格式,时间离散采用 Euler 格式,压力梯度离散格式采用 Gauss linear,拉普拉斯项采用 Gauss linear corrected 格式。计算时间步采用自适应时间步,保证计算过程中每步计算得到的 CFL 数小于0.4。气泡为圆形,两气泡直径为0.01 m, $Eotvos$ 数为16, $Morton$ 数为0.0002。数值边界条件的设置如表1所示。

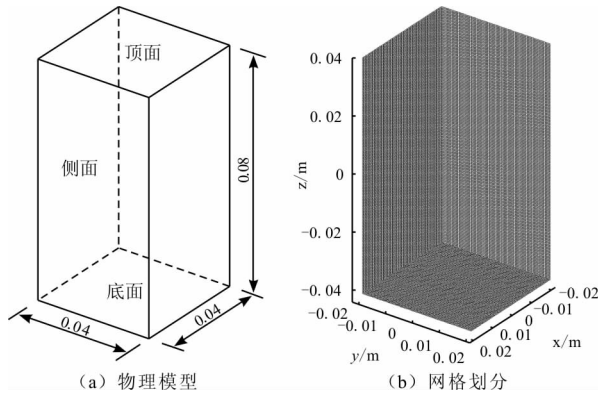


图1 物理模型及网格划分(单位:m)

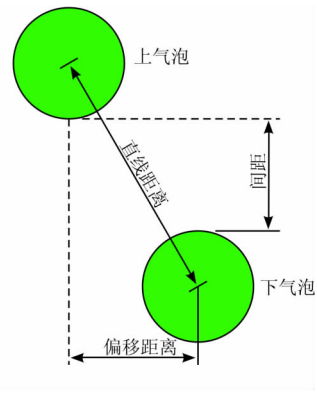


图2 气泡位置参数

表1 不同求解变量边界条件

物理边界	求解变量		
	体积分数	压力	速度
底面	dynamicAlphaContactAngle	fixedFluxPressure	fixedValue
顶部	dynamicAlphaContactAngle	totalPressure	pressureInletOutletVelocity
壁面	dynamicAlphaContactAngle	fixedFluxPressure	fixedValue

3.3 算例设置

为了更准确地说明两气泡的初始位置,如图2所示,定义了气泡的间距,气泡的偏移距离和气泡直线距离,气泡初始为静止状态,受浮力作用开始上浮。表2为气泡的算例设置,共设置了5个算例用于考察气泡的间距以及偏移距离对气泡运动行为的影响。

表2 算例设置

算例编号	气泡直径/m	气泡间距/m	气泡偏移距离/m	气泡直线距离/m
1	0.01	0.005	0.003	0.00583
2	0.01	0.005	0.006	0.00781
3	0.01	0.003	0.003	0.00424
4	0.01	0.007	0.003	0.00762
5	0.01	0.005	0	0

4 验证

4.1 两气泡运动形态验证

采用3.1节所述的三维几何模型、网格设置以及计算方法等对两个在线气泡上升运动行为进行数值模拟,不同时间下的气泡形态模拟及实验结果如图3所示。本文的模拟结果(图3(a))与Annaland等^[17]的数值模拟结果(图3(b))基本一致,且与Brereton等^[18]实验观察到的现象(图3(c))相同,表

明本文所采用的计算方法及数学模型能够准确地反映气泡的上升运动及聚并过程的气泡形态。

4.2 单气泡上升破碎

以上的验证结果虽然能够验证本文算法模拟的气泡运动形态与实验相符,但缺少模拟数据与实验数据的对比。因此,对单个气泡的上升过程进行模拟,图4给出了无量纲化的气泡厚度以及气泡顶部位移随时间的变化曲线(坐标轴名称中,无量纲化时间: t 为真实时间, s ; R 为气泡直径, m ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 。无量纲气泡厚度: T 为气泡运动过程真实厚度, m 。无量纲气泡顶部位移: d 气泡顶部位移, m 。),其中图4(a)为气泡轴心厚度随时间变化,图4(b)为气泡顶部位移随时间变化。计算域参照文献[11]采用二维长方形模型,长为 0.3048 m ,宽为 0.254 m ,气泡半径为 0.0254 m ,气泡中心初始位置距离计算域底部 0.1016 m ,网格划分采用结构化网格,其中二维模型长度划分240个网格,宽度划分200个,总网格数量为48 000。气液物性参数见文献[11]。图4(a)、4(b)中本文的计算结果与文献中的实验结果^[19]基本一致,进一步验证了本文模型的准确有效。

5 结果与讨论

5.1 流场结构

图5(a)~5(e)分别为算例1~5不同时间气泡周围流场图。当两个气泡偏移距离为0时,如图5

(e)所示,两气泡的上浮过程中,流场剪切导致在气泡两侧共形成了4个对称小旋涡,上下两个气泡两侧旋涡的流向一致,均从气泡下表面沿着气泡内部凹陷的气液交界面转向上表面,其中左侧旋涡为逆时针,右侧旋涡为顺时针,当两气泡邻近聚并及聚并成一个大气泡以后旋涡结构发展为一组对称的大旋涡。当存在偏移距离时,如图5(a)~(d)所示,上气泡的尾流对下气泡产生影响,诱导下气泡向上气泡所在位置运动,旋涡的大小及分布受两气泡上下间距及偏移距离影响,当两气泡未发生聚并时,两气泡周围均形成4个不同大小非对称结构的旋涡;下气泡左侧的旋涡分布范围较小,且随着两气泡上浮,

旋涡分布范围不断缩小;当两气泡临近聚并及聚并后,气泡周围存在两个非对称的大旋涡,且气泡左侧旋涡影响区域较大。

如图5(a)、5(b)所示,当气泡间距相同时,下方气泡偏移距离越大,在 $t = 0.125s$ 和 $t = 0.175s$ 时刻气泡聚并前后气泡左侧旋涡结构覆盖的区域也越大。如图5(c)、5(d)所示,当气泡间距不同,气泡偏移距离相同时,间距越小气泡旋涡结构演变越快,图5(c)由 $t = 0.025s$ 时刻的4个旋涡发展为 $t = 0.075s$ 时刻的两个旋涡,而图5(d)中,旋涡结构形态与图5(c)较为类似但旋涡的变化明显滞后于图5(c)。

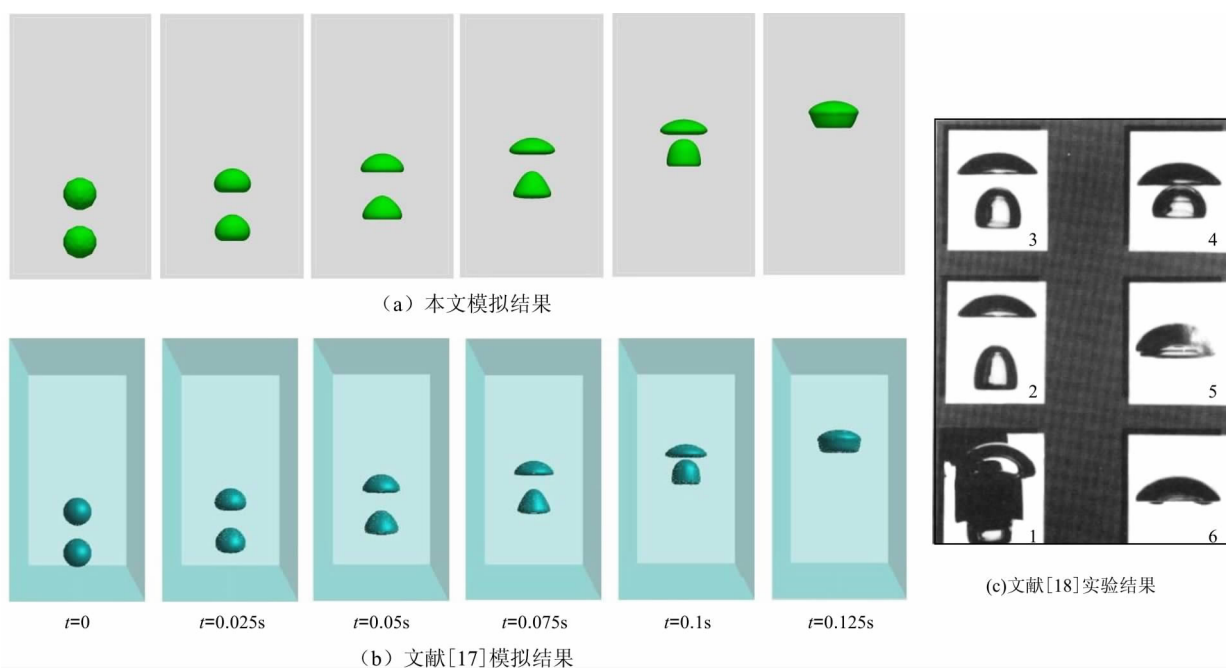


图3 在线气泡运动行为的实验及模拟结果

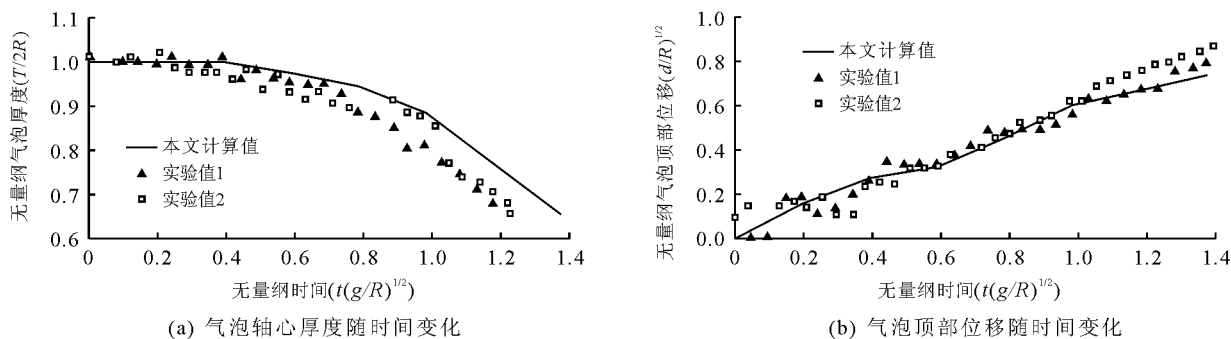


图4 气泡气泡轴心厚度及顶部位移随时间变化

5.2 气泡形态

图6为随时间变化的气泡运动形态。由图6(a)~(d)可以发现,气泡之间的间距以及偏移距离影响着不同时刻的气泡运动形态,上气泡在浮力作用下随时间增大不断上升,在此过程中由于气泡的

顶面和底面存在不同大小的压力值,底部的压力作用使得气泡向内凹陷,气泡的横向直径不断增大,气泡的轴向厚度不断缩小。下气泡一方面受到浮力作用不断上升,另一方面受到上方气泡流场结构的影响,气泡上升路径呈曲线且不断向上气泡方向偏移;

下气泡形态随时间不断变化从圆形变为倒圆锥形并不断变化为尾部凹陷的子弹形直至最终气泡聚并。

当两个气泡间距相同偏移距离不同时(算例1、2、5),如图6(a)、6(b)、6(e)所示,两个气泡的偏移距离越大则气泡聚并时间越长;当气泡偏移距离为

0时,如图6(e)所示,此时两气泡为在线气泡,在 $t = 0.175$ s 时两气泡聚并形成一个扁球帽形气泡;此外,图6(a)、6(b)在 $t = 0.175$ s 时聚并形成的气泡虽然也呈现球帽形,但气泡的轴向厚度随气泡偏移距离的增大而增大。

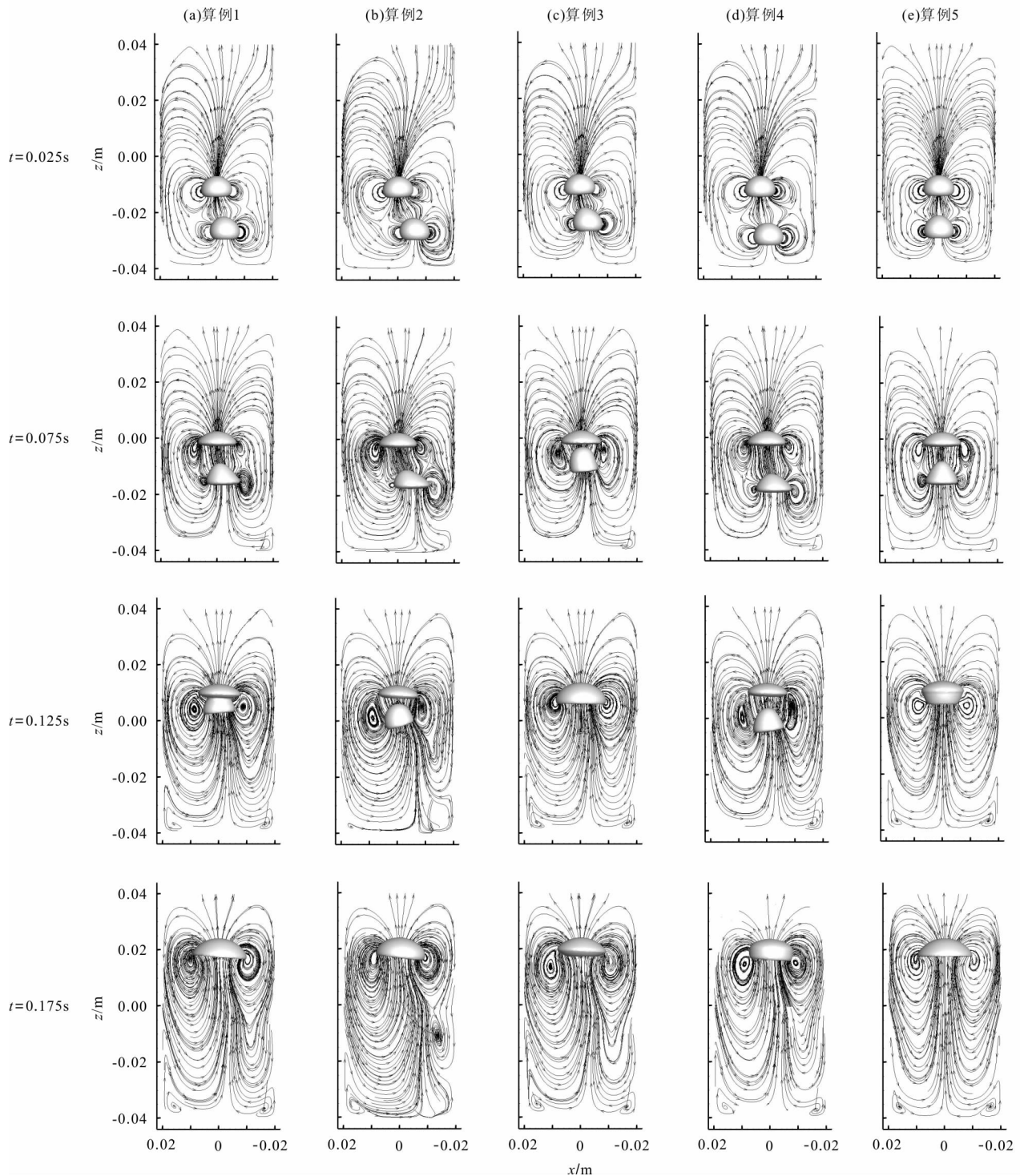


图5 算例1~5不同时间气泡流场

如图6(c)、6(d)所示,当气泡偏移距离一定,两气泡上下间距增大时,两气泡从独立运动到聚并为一

个气泡所需要的时间增大;聚并形成的气泡在 $t = 0.175$ s 时也呈球帽状,但图6(c)中气泡轴厚度最薄,6

(d)中气泡轴厚度最厚;图6(c)中,两气泡由独立运动到聚并为一个大气泡所用的时间最短,这主要是由于上下气泡间距及偏移距离较小,两气泡的直线距离最小造成的。此外,虽然算例4两气泡的直线距离小于算例2(见表2),但图6(d)中显示的两气泡最终的

聚并时间大于图6(b),这主要是由于算例4两气泡的间距明显大于算例2,且由于下方气泡存在偏移距离,运动轨迹并不呈直线,导致算例4的聚并时间最长。总之,上下气泡的间距以及偏移距离影响着不同时刻气泡运动形态及聚并为一个气泡所需要的时间。

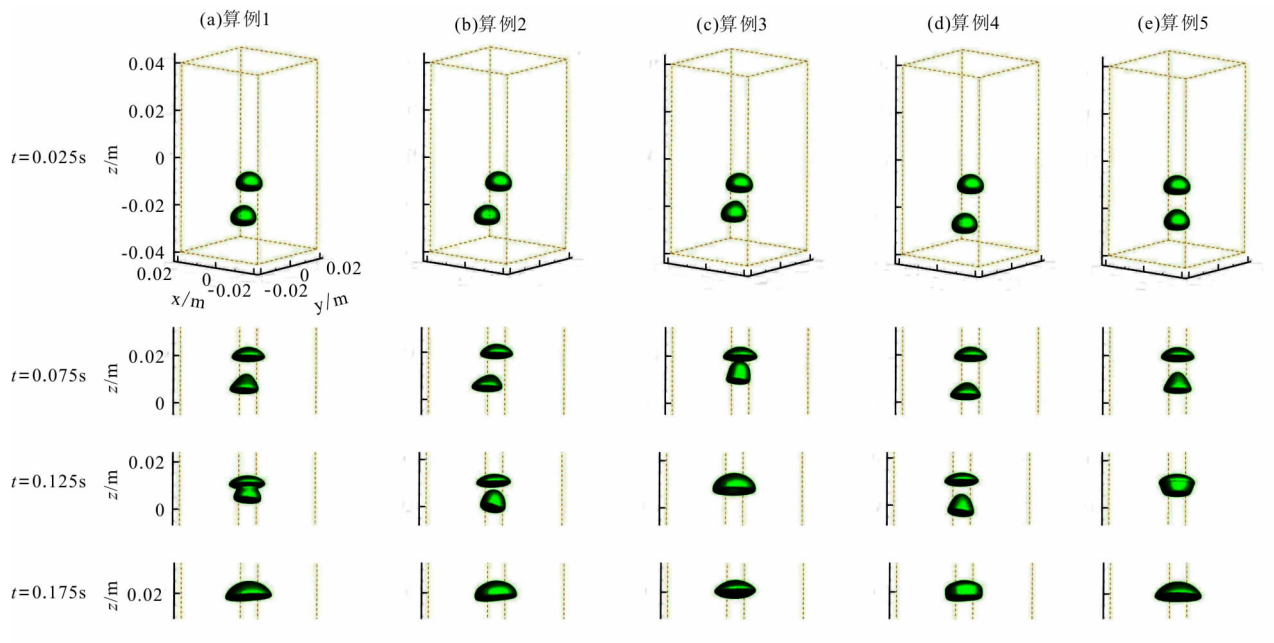
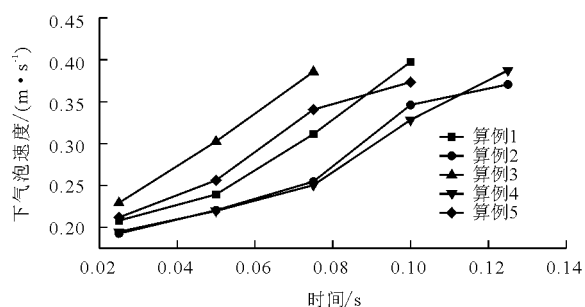


图6 算例1~5不同时间气泡形态

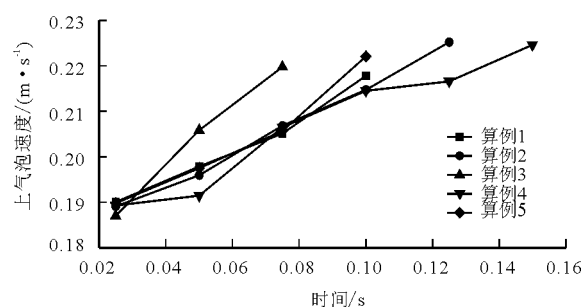
5.3 气泡速度

图7(a)、7(b)分别为下气泡、上气泡的气泡顶部 z 方向速度值。由图7可看出,两个气泡速度均随着时间增大而增大,且上气泡速度值明显低于下气泡速度值,这主要是由于上气泡受到阻力影响较大速度较慢,下气泡除受到阻力影响外还受到上气泡的尾流影响速度较快。图7(a)、7(b)算例3中,上下气泡上升速度幅度均较大,而算例4中两气泡上升速度幅度均较小。对比相同间距不同偏移距离算例1、2、5发现,算例5中的上下气泡速度增幅明显大于算例1和2,两气泡的速度增幅总体上随偏移距离的增大而减小。

图8(a)~8(e)分别为算例1~5不同时间 z 方向速度场,气泡速度的高值区集中在气泡内部中心区域附近,随着气泡不断上升,速度场的分布区域逐渐增大,且当气泡聚并时间前后 z 方向速度的峰值达到最大;在 $t=0.025\text{ s}$ 时,在两个气泡的中间区域速度较低,两个气泡的中心区域速度较高,速度分布范围呈现为两个间隔的椭圆形分布区域,并随时间 z 方向速度区域逐渐变化,在 $t=0.175\text{ s}$ 时的 z 方向速度分布呈倾斜状椭圆形,倾斜角度受偏移距离的影响。当偏移距离最大时如图8(b)所示,椭圆形下部区域倾斜角度较高,而图8(e)中两气泡由于不存在偏移距离,速度呈 $x=0$ 对称分布。



(a) 下气泡速度随时间变化



(b) 上气泡速度随时间变化

图7 不同时间气泡顶点 z 方向速度

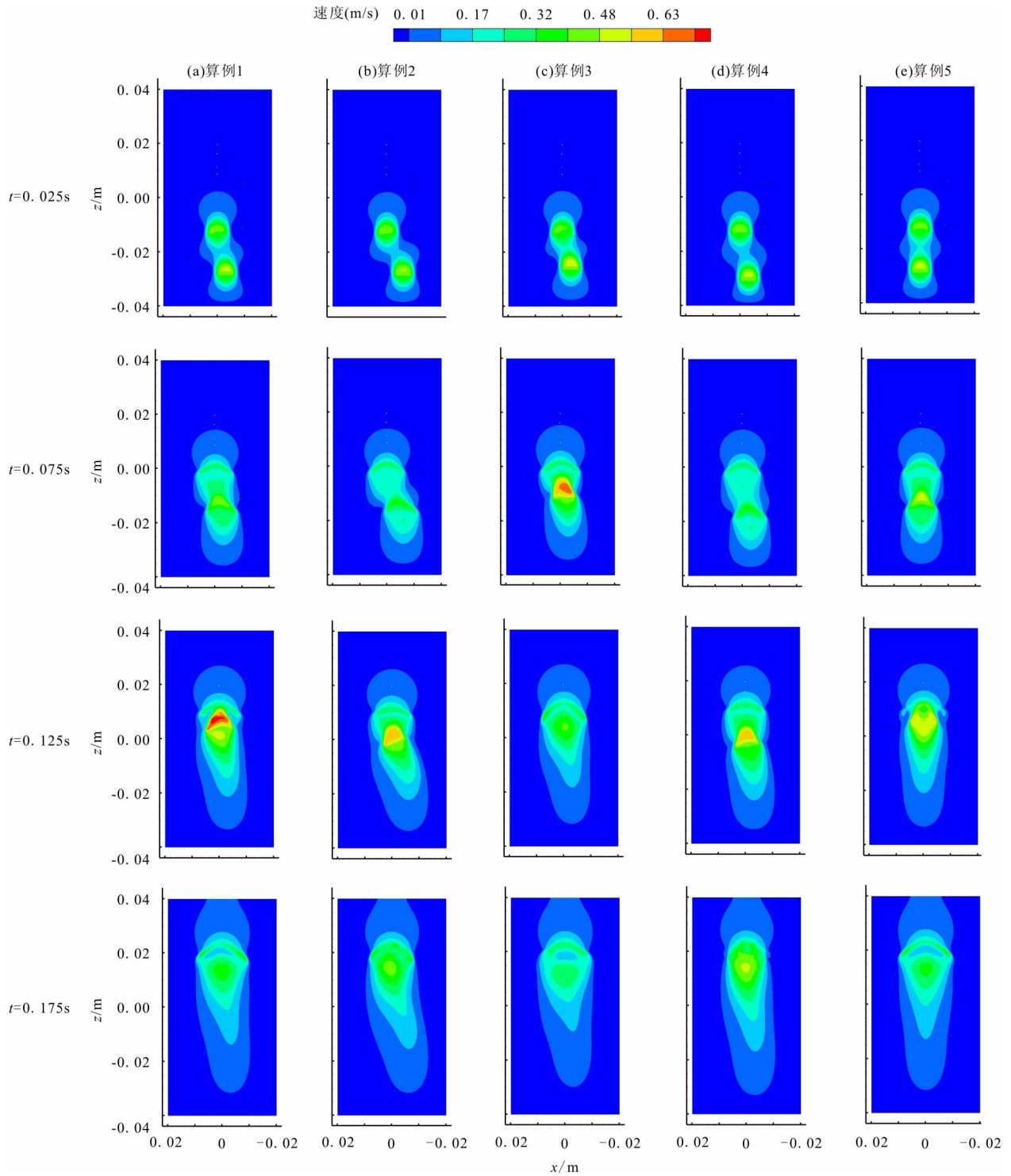


图8 算例1~5不同时间气泡 z 方向速度场

5.4 气泡间距

图9为两气泡的间距随时间的变化,随着时间的增加两气泡的间距呈现先增加后减小的变化。其中算例3两气泡从初始状态到聚并为一个气泡时间最短,其原因主要是由于两气泡初始间距最小。在算例4中,由于相同的因素,两气泡初始间距最大,

导致聚并所需的时间也最长。在相同的初始间距下,如算例1、2、5所示,偏移距离越大气泡聚并所需要的时间越长。因此曝气过程中,相同曝气量下,曝气孔的偏移距离增大,不利于气泡的聚并,这也意味着小气泡数目较多,气液的交换面积较大,能够改善曝气池内的气液传质。

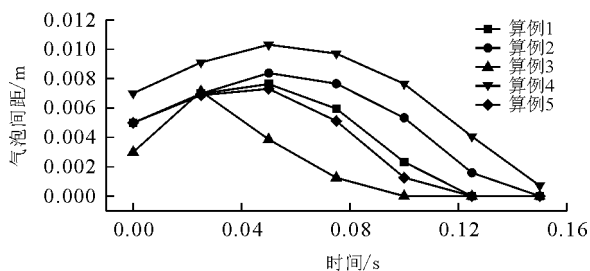


图9 两气泡间距随时间变化

6 结 论

(1) 两气泡交错分布上升过程中气泡未聚并时,两气泡周围分布4个不同大小的旋涡,下方气泡的左侧旋涡影响区域较小。当气泡邻近聚并及聚并为一个气泡以后,旋涡结构演变为2个非对称的旋涡,偏移距离越大,左侧旋涡影响的范围也越大。

(2) 两气泡的间距及偏移距离影响着气泡上升及聚并过程中的气泡形态。两气泡由初始位置的球形,不断上升最终聚并成为一个球帽形大气泡。当两气泡偏移距离为0时,球帽形气泡为对称分布;气泡间距越大,聚并后的球帽形气泡轴向厚度越厚且横向尺寸越短。

(3) 计算域内 z 方向速度分布从初始时刻的呈上、下两个椭圆形,演变为一个倾斜状椭圆形,倾斜度与偏移距离相关。上、下两个气泡顶点速度均随着时间增大而增大,且上气泡速度值明显低于下气泡速度值,偏移距离越大,上、下气泡速度的增幅越小。两气泡的间距呈现先增加后减小的特点,初始间距影响着气泡最终的聚并时间。

参考文献:

- [1] Wu Mingming, Gharib M. Experimental studies on the shape and path of small air bubbles rising in clean water[J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(7):L49-L52.
- [2] Marco 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.
- [3] Balcázar N, Lehmkuhl O, Jofre L, et al. Level-set simulations of buoyancy-driven motion of single and multiple bubbles[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2015, 56:91-107.
- [4] Yu Zhao, Fan Liangshi. Direct simulation of the buoyant rise of bubbles in infinite liquid using level set method[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2008, 86(3):267-275.
- [5] Ryu S, Sungho K O. A comparative study of Lattice Boltzmann and volume of fluid method for two-dimensional mul-

tiphase flows[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2012, 44(6), 623-638.

- [6] Cifani P, Michalek W R, Priems G J M, et al. A comparison between the surface compression method and an interface reconstruction method for the VOF approach[J]. *Computers and Fluids*, 2016, 136:421-435.
- [7] 蒋昌波,王刚,邓斌,等. 不同尺度水平并列气泡运动特性三维数值研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(2):233-245.
- [8] Liu Jingru, Zhu Chunying, Fu Taotao, et al. Systematic Study on the Coalescence and Breakup Behaviors of Multiple Parallel Bubbles Rising in Power-law Fluid[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(12):4850-4860.
- [9] 孙红霞,苏军伟. 亚网格内两相流动界面位置的精确定位算法[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(1):79-87.
- [10] 杜煜昊,熊凯文,张莹,等. 水平布置等径气泡上升运动数值模拟分析[J]. *计算力学学报*, 2016, 33(6):889-894.
- [11] 孙鹏楠,李云波,明付仁. 自由上浮气泡运动特性的光滑粒子流体动力学模拟[J]. *物理学报*, 2015, 64(17):199-213.
- [12] 林贤坤,李健,荣吉利,等. 5阶WENO有限差分法在界面追踪中的应用[J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(4):341-346.
- [13] Ganesan P B, Islam M T, Sahu J N, et al. Effect of column angles to rise velocity of a single bubble: a CFD study[J]. *Progress in computational Fluid Dynamics*, 2016, 16(5):288.
- [14] Ma Dou, Liu Mingyan, Zu Yanggui, et al. Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 72(16):61-77.
- [15] Liu Jingru, Zhu Chunying, Fu Taotao, et al. Numerical simulation of the interactions between three equal-interval parallel bubbles rising in non-Newtonian fluids[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 93(4):55-66.
- [16] Min J K, Park I S. Numerical study for laminar wavy motions of liquid film flow on vertical wall[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(15-16):3256-3266.
- [17] Annaland M V S, Deen N G, Kuipers J A M. Numerical simulation of gas bubbles behaviour using a three-dimensional volume of fluid method[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(11):2999-3011.
- [18] Brereton G, Korotney D. Coaxial and oblique coalescence of two rising bubbles[C]//The ASME Applied Mechanics conference, New York USA: ASME 1991.
- [19] Walters J K, Davidson J F. The initial motion of a gas bubble formed in an inviscid liquid. Part 1. The two-dimensional bubble[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1962, 17(3):408-416.