

密度分层情况下气泡浮射流结构数值研究

张添豪，牛小静

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京，100084, Email: nxj@tsinghua.edu.cn)

摘要：本研究使用开源计算流体力学类库 OpenFOAM 对密度分层环境中的气泡浮射流问题进行数值模拟，研究截面上液相垂向速度和气相分数的分布规律。数值模拟结果很好地再现了气泡浮射流的双羽流结构，并与试验数据吻合良好。数值结果表明，当环境流体密度均匀时，液相垂向速度和气相分数在横截面上呈高斯分布；当环境流体密度分层时，气泡浮射流卷吸的流体会在一定高度剥离下沉，形成双羽流结构，此时气相分数的分布与高斯分布吻合较好，但液相垂向速度的分布与高斯分布吻合较差。结果分析表明，采用一个正高斯分布和一个负高斯分布叠加来对液相垂向速度进行描述，可以得到较为满意的结果。

关键词：气泡浮射流；OpenFOAM；密度分层；双羽流

1 背景介绍

海底井喷溢油的水下过程是典型的油气多相浮射流问题，在深海密度分层环境下表现为复杂的动力结构，溢油追踪模型常采用一维断面积分模型模拟。气泡浮射流作为多相浮射流的典型代表，研究气泡浮射流截面上各相速度和体积分数的分布有助于完善和改进一维断面积分模型。

对于均匀水体中浮射流流场结构的研究有许多。经典的试验研究均表明，环境密度均匀条件下气泡浮射流在横断面上的流速和气相分数分布具有很好的自相似性，在充分发展区域满足高斯分布。如 Iguchi 等^[1]曾通过气泡浮射流试验观测证明了不同高度横截面上的流速分布和气相分数分布满足高斯分布并具有自相似性。Rensen 等^[2]通过试验分析了气泡羽流的非恒定特征，观测得到气相分数的时均分布也很好满足高斯分布。

而环境密度分层情况下气泡浮射流的流动结构则要相对复杂。McDougall^[3]通过试验观测提出密度分层情况下的双羽流结构。在环境流体密度分层的气泡浮射流中，具有较大浮力通量的气泡会卷吸底部较重流体向上运动，这部分重流体在上升过程中受到周围较轻环境流体的负浮力作用会逐渐减速，最终从浮射流主体周围剥离并向下运动，在

资助项目：国家自然科学基金面上项目“水下井喷油气混合物多相浮射流研究”（51479101）

浮力中性层形成水平侵入层。在剥离影响的范围，浮射流主体附近的液相垂向速度是向下的。Seol 等^[4]通过水箱试验模拟了密度分层条件下的气泡浮射流，观测卷吸流体的影响范围，但未观测流速场。

随着计算机计算能力的发展，近年来使用数值方法模拟气泡浮射流结构的研究越来越多，如 Fraga 等^[5]使用 Eulerian-Lagrangian 大涡模拟的方法模拟均匀环境下气泡浮射流的流动，得到流速的分布服从高斯分布并具有自相似性。本研究使用基于 Euler-Euler 框架的开源计算流体力学类库 OpenFOAM 模拟环境流体密度分层情况下的气泡浮射流，研究其流场结构。

2 数值模型

数值模拟基于开源计算流体力学类库 OpenFOAM 的 reactingMultiphaseEulerFoam 求解器。模型以 Euler-Euler 多相流方程为控制方程，采用 LES 模拟紊流。本研究工作对求解器进行了修改，添加了温度和染色剂浓度的对流扩散方程，用于模拟密度分层条件、追踪卷吸流体影响范围。

第 Φ 相的连续性方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial (\alpha_{\Phi} \rho_{\Phi})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{\Phi} \rho_{\Phi} \mathbf{U}_{\Phi}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\alpha_{\Phi} \mathbf{U}_{\Phi})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{\Phi} \mathbf{U}_{\Phi} \mathbf{U}_{\Phi}) = \\ - \frac{\alpha_{\Phi} \nabla p}{\rho_{\Phi}} + \alpha_{\Phi} \mathbf{g} + \nabla \cdot (\alpha_{\Phi} \nu_{eff} \nabla \mathbf{U}_{\Phi}) + \mathbf{M}_{\Phi} \end{aligned} \quad (2)$$

其中，下标 Φ 表示第 Φ 相， α 表示相分数， ρ 为密度， \mathbf{U} 为速度， p 为压强， ν_{eff} 为有效粘度。 \mathbf{M} 为相间动量交换项，只考虑离散相与连续相之间的相互作用，包括拖曳力、升力和虚拟质量力。

假设环境流体密度分层仅由温度 T 引起，根据 Boussinesq 近似， $\rho = \rho_r [1 - \beta (T - T_r)]$ ，其中 ρ_r 为水的参考密度， T_r 为参考温度， β 为水的热胀系数。温度场的控制方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}T) = \kappa \nabla^2 T \quad (3)$$

其中 κ 为扩散系数。

为了追踪被卷吸流体的运动，模拟过程中在入口处加入染料，染料的输移扩散范围反映被卷吸流体的运动轨迹。染料在流体中满足对流扩散方程

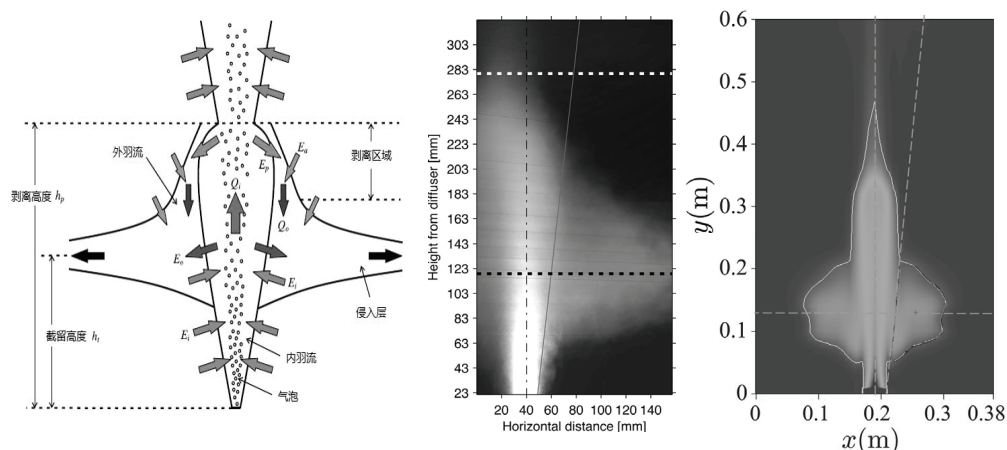
$$\frac{\partial C_{dye}}{\partial t} + \nabla \cdot (UC_{dye}) = \kappa \nabla^2 C_{dye} \quad (4)$$

其中 C_{dye} 为染料浓度。

3 模型验证

Seol 等^[4]采用平面激光诱导荧光技术对密度分层情况下的气泡浮射流进行试验观测。试验在 $38\text{cm} \times 80\text{cm} \times 38\text{cm}$ 的有机玻璃水箱中进行, 起泡器位于水箱底部中央, 直径为 14mm , 空气流量保持为 $0.1\text{L}/\text{min}$ 。另外还在水箱底部注入染色剂, 追踪水箱内流体的运动轨迹。对瞬时染料浓度场的分布图进行处理可以得到浮射流的剥离高度和截留高度。

数值模拟依据试验设置, 计算域的几何尺寸为 $38\text{cm} \times 80\text{cm} \times 38\text{cm}$ 的长方体, 采用均匀正方体网格, 网格单元的尺寸为 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 。初始时水箱内水柱高度为 0.7m , 环境流体密度分层的条件与 Seol 等^[4]一致。气体进口边界位于水箱底部中心 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 处, 保持进口处的空气流量为 $0.1\text{L}/\text{min}$, 进口处气体流速为 $0.42\text{cm}/\text{s}$ 。水和空气的基本物理参数取 25°C 下的值。取 30s 到 75s 的瞬时场处理得到时均场。



(a) 浮射流结构示意图^{[4][6]} (b) Seol 等试验浮射流结构 (c) 数值模拟得到的浮射流结构

图 1 Seol 等 (2009) 试验和本研究数值模拟得到的结果

图 1 (a) 是气泡羽流在密度分层环境中所呈现的双羽流结构示意图^[3,6]。在环境流体分层情况下, 气泡从底部中心进入水箱, 由于气泡和流体的密度相差很大, 因而具有较大浮力通量的气泡会携带底部密度较大的流体向上运动。在运动的过程中, 被卷吸流体的密度比周围流体大, 因而会受到向下的浮力作用。在负浮力的作用下, 大密度流体的动量逐渐减小, 直至为零时从气柱周围剥离。剥离的流体向下运动, 最终形成一个水平侵入层。被卷吸的流体开始剥离的高度称为剥离高度, 水平侵入层所在的高度称为截留高度。气柱核

心附近受剥离作用影响很小的区域为内羽流，内羽流外部流体剥离和截留的区域为外羽流。

图 1(b)是 Seol 等^[4]通过试验观察得到的时均气泡浮射流结构，图 1(c)是本文数值模拟得到的浮射流结构，可以看到本文模拟出了和 Seol 等（2009）^[4]试验观测类似的双羽流结构。根据模拟结果得到浮射流的截留高度为 0.132m，时均剥离高度为 0.330m；而 Seol 等（2009）通过图像分析给出截留高度为 0.145m，剥离高度为 0.312m。模拟得到的浮射流形态特征参数与试验接近，稍微偏小。模型验证的结果表明该数值方法可以较好地模拟出气泡浮射流的双羽流结构，模拟的精度较好，因此可以用于研究分层环境中的多相浮射流问题。

4 浮射流结构结果分析

计算域的几何尺寸为 40cm×80cm×40cm 的长方体，采用均匀正方体网格，网格单元的尺寸为 1cm×1cm×1cm。气体进口边界位于水箱底部中心 2cm×2cm 处，液相初始速度为 0，水箱内水深 0.7m，顶部 0.1m 为空气。水和空气的物理参数使用 25℃和标准大气压下的值。初始时水箱内水深 0.1m 以内的区域密度保持为 1000kg/m³，水深 0.1m 以下的区域流体密度线性分层。设置 4 个算例，密度梯度分别为 0kg/m⁴、-20kg/m⁴、-50kg/m⁴和 -100kg/m⁴，其中第一种为密度均匀情况。

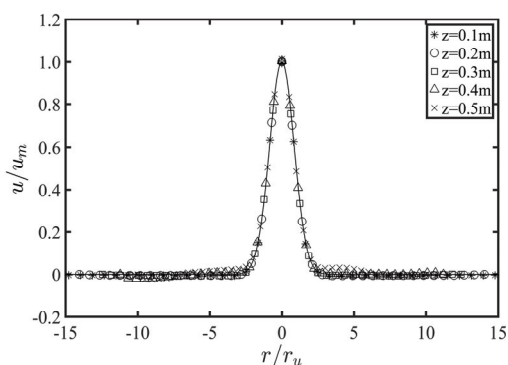


图 2 密度均匀情况下的流速分布

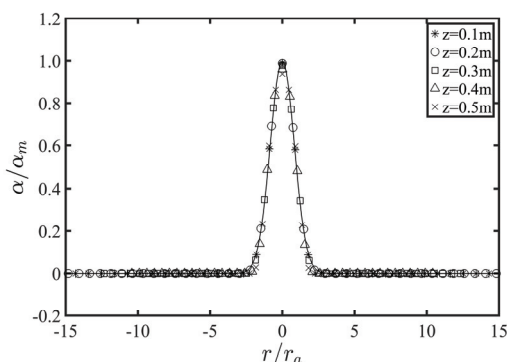


图 3 密度均匀条件下的气相分数分布

对于密度均匀的算例，取 0.1~0.5m 间隔 0.1m 的 5 个横截面进行分析，将液相流速和气相分数无量纲化后分别画到同一张图上。图 2 为液相垂向速度的分布图，图 3 为气相分数的分布图，其中 r_u 是速度半宽，即流速为 $u_m/2$ 处距中心线的距离， r_a 为气相分数半宽。从图中可以看出，在环境流体密度不分层的情况下，不同高度截面上的液相垂向速度和气相分数的分布均很好地服从高斯分布并具有自相似性。

密度梯度为 -50kg/m⁴ 的算例与密度均匀情况时类似，做同样的处理可以得到液相流速和气相分数的分布图。从图 4 中可以看到，受浮射流剥离-截留作用的影响，液相的垂向速

度会出现负值，因此使得计算所得数据与高斯分布曲线吻合较差。而图 5 中气相分数的分布和不分层情况基本一致，与高斯曲线吻合良好。

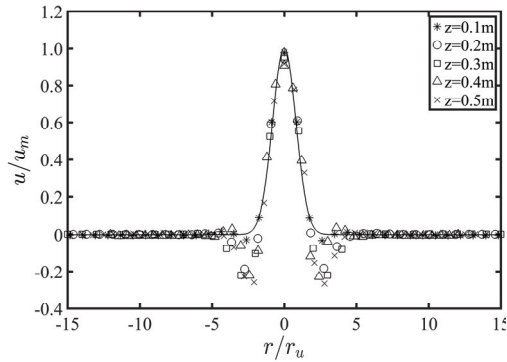


图 4 密度梯度为 -50kg/m^4 时的流速分布

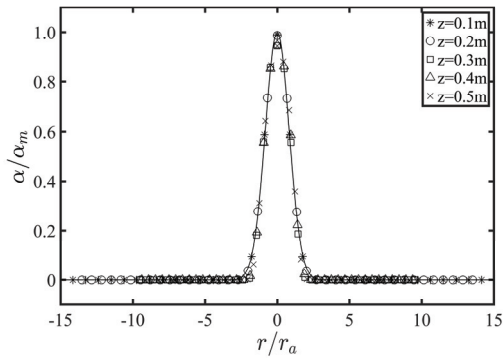


图 5 密度梯度为 -50kg/m^4 时的气相分数分布

考虑密度分层环境下的气泡浮射流可模化为一个正向气泡浮射流与一个负密度浮射流的线性叠加，这里尝试使用一个正的高斯分布与一个负的高斯分布叠加来描述流速分布。其中正高斯分布的峰值采用密度不分层情况的峰值，负高斯分布表示相比不分层情况由于密度分层的影响所造成的流速变化。拟合的表达式为

$$u = u_m \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{r}{r_{u1}} \right)^2 \right] - a_f \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{r}{r_{u2}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

其中 u_m 为密度不分层情况下的中心线流速值， r_{u1} 和 r_{u2} 分别为正高斯分布和负高斯分布的速度半宽。

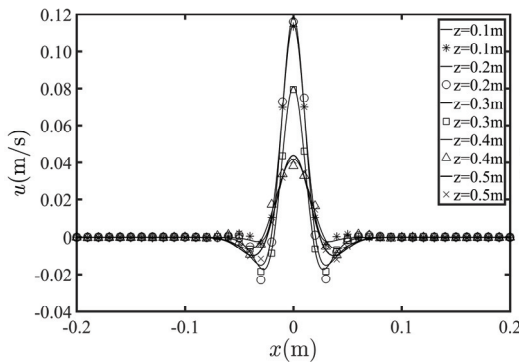


图 6 使用双高斯分布得到的流速分布曲

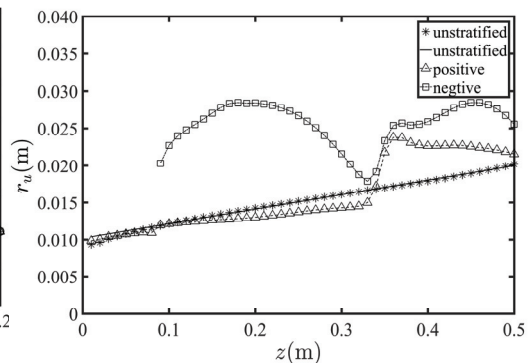


图 7 浮射流半宽随高度的变化曲线

图 6 为不同高度上的流速使用双高斯分布拟合得到的结果，可以看到对于不同横截面双高斯分布曲线均有较好地模化效果。对密度梯度为 -20kg/m^4 和 -100kg/m^4 的算例也得到了

较好的拟合结果。

图 7 为密度不分层和分层情况下浮射流速度半宽的变化。可以看到，当环境流体密度不分层时，浮射流的速度半宽基本是满足线性扩展的；图 7 中三角形符号和圆形符号分别表示正高斯分布和负高斯分布的半宽，对应于气泡浮射流的双羽流结构，正高斯分布的半宽表示内羽流的边界，负高斯分布的半宽表示外羽流的边界。从图中可以看到，在第一个截留高度（0.132m）以下时，内羽流边界与不分层情况的边界基本重合，在第一个截留高度与第一个剥离高度（0.330m）之间时，内羽流边界比不分层情况的边界稍微偏小，但基本还是线性扩展的，在第一个截留高度之后，内羽流边界迅速变大，之后均保持一个较大的值。外羽流边界在第一个截留高度和剥离高度之间有一个先变大再变小的过程，在第一个剥离高度与内羽流边界重合，在第一个剥离高度之后又重复之前的过程。从浮射流半宽变化曲线可以明显地看出密度分层情况下浮射流的双羽流结构。

图 8 和图 9 分别为不同情况下浮射流中心线的液相垂向速度和气相分数随高度的变化。可以看到在不分层情况时，中心线流速一直在增加，但增加的幅度逐渐变缓，在密度分层时，流速变化存在较大的波动，分析可知波动的极小值点对应了浮射流的剥离高度，从图 8 中可以看出，随着密度梯度绝对值的增大，浮射流的剥离高度在逐渐减小。对于气相分数的分布，不管是分层情况还是不分层情况，气相分数都随着高度逐渐降低。在密度分层时，随着密度梯度绝对值的增加，气相分数的变化曲线与不分层相比重合的部分逐渐变少。

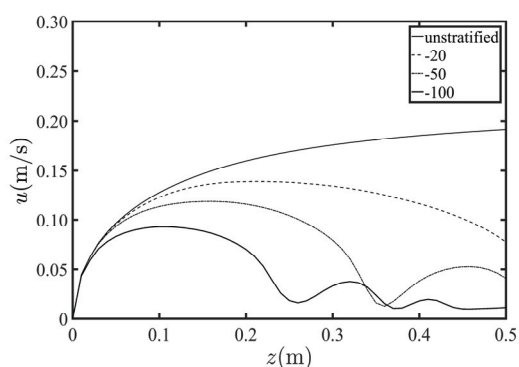


图 8 中心线流速随高度的变化曲线

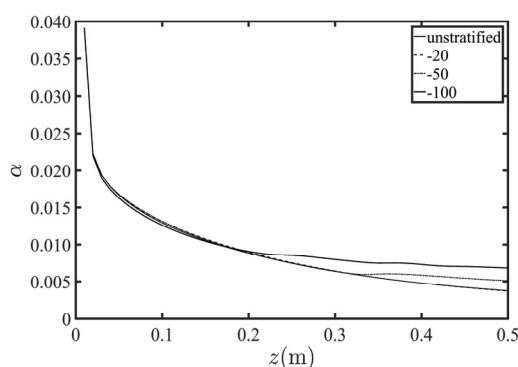


图 9 中心线气相分数随高度的变化曲线

5 结论

本研究讨论了环境流体密度分层和不分层情况下气泡浮射流的结构，为分层情况下的一维积分模型提供参考依据。结果表明，当环境流体密度均匀时，液相垂向速度和气相分数在横截面上呈高斯分布并具体较好的自相似性；当环境流体密度分层时，由于浮射流卷吸流体的剥离下沉，使用单个高斯分布的模化效果较差，而使用一个正高斯分布与一个负高斯分布叠加的模化效果很好。不分层情况下浮射流半径是线性扩展的，而分层情况下内

羽流半径的扩展在第一个剥离高度下基本是线性的，外羽流半径的扩展在第一个剥离高度和截留高度之间先增大再减小，并且在第一个截留高度附近达到最大。不分层情况和分层情况下中心线上的气相分数分布规律基本一致，均为逐渐减小，不分层情况下的中心线流速分布较为平缓，而分层情况下的流速分布波动较大，而且波动的位置与浮射流的截留高度和剥离高度密切相关。

参 考 文 献

- 1 Iguchi M, Ueda H, Uemura T. Bubble and liquid flow characteristics in a vertical bubbling jet. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21(5): 861-873.
- 2 Rensen J, Roig V. Experimental study of the unsteady structure of a confined bubble plume. *International journal of multiphase flow*, 2001, 27(8): 1431-1449.
- 3 McDougall T J. Bubble plumes in stratified environments. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 85(4): 655-672.
- 4 Seol D G, Bryant D B, Socolofsky S A. Measurement of behavioral properties of entrained ambient water in a stratified bubble plume. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(11): 983-988.
- 5 Fraga B, Stoesser T, Lai C C K, et al. A LES-based Eulerian-Lagrangian approach to predict the dynamics of bubble plumes. *Ocean modelling*, 2016, 97: 27-36.
- 6 Yang D, Chen B, Socolofsky S A, et al. Large-eddy simulation and parameterization of buoyant plume dynamics in stratified flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 794: 798-833..

Numerical study on the structure of bubble plume in stratified environments

ZHANG Tian-hao, NIU Xiao-jing

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084.

Email: nxj@tsinghua.edu.cn)

Abstract: In this study, the open source computational fluid dynamics library OpenFOAM is applied to numerical simulation of bubbly plumes in stratified fluid, and the distribution of liquid vertical velocity and gas fraction is studied. The numerical simulation results reproduce well the double-plume structure of bubbly plume and agree well with the experimental data. When the ambient fluid density is constant, the profiles of liquid vertical velocity and gas fraction are in

good agreement with Gaussian curves; When the density of the ambient fluid is stratified, the entrained ambient fluid peels off the bubble core within a certain height range and sinks to form a double-plume structure. In the stratified cases, the distribution of the gas fraction is in good agreement with the Gaussian distribution, but the distribution of the liquid vertical velocity is much complex. The superposition of a positive Gaussian distribution and a negative Gaussian distribution is used to describe the liquid vertical velocity, and satisfactory results can be obtained.

Key words: Bubbly plume; OpenFOAM; Stratified environments; Double-plume.