

气升式反应器气液(泥浆)两相流数值模拟研究

陈文邦¹, 赵立新¹, 黄鹏^{1,2}, 秦松岩¹

(1. 天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300092)

摘要: 利用 FLUENT15.0 软件对气升式反应器内气液(泥浆)两相流进行数值模拟, 分析了不同液相介质、不同通气量下反应器内流场的变化情况。模拟结果表明, 当温度为 25 ℃ 时, 反应器内液相介质为泥浆的流场工况(气含率、液相速度及湍流强度)均低于水。液相介质为泥浆时, 随着通气量的增大, 反应器底部的液相速度、气含率均增大; 反应器上部的气含率先升后降, 液相速度和湍流强度则一直增大。

关键词: 气升式反应器; 气液(泥浆)两相流; FLUENT15.0 软件; 流场; 通气量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)01-0087-05

Numerical Simulation of Gas-liquid (Slurry) Two-phase Flow in Airlift Reactor

CHEN Wen-bang¹, ZHAO Li-xin¹, HUANG Peng^{1,2}, QIN Song-yan¹

(1. School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300092, China)

Abstract: The process of gas-liquid (slurry) two-phase flow in airlift reactor was simulated by FLUENT15.0 software, and the variations of the flow field in the reactor were analyzed under different liquid media and different ventilation rate. The simulation results showed that the flow field conditions (gas hold-up, liquid velocity and turbulent intensity) of slurry as the liquid medium in the reactor were lower than that of water when the temperature was 25 ℃. When the liquid medium was slurry, the liquid velocity and gas hold-up at the bottom of the reactor all increased with the increase of ventilation rate. The gas hold-up in the upper part of the reactor increased first and then decreased, while the liquid velocity and turbulent intensity increased continuously.

Key words: airlift reactor; gas-liquid (slurry) two-phase flow; FLUENT15.0 software; flow field; ventilation rate

气升式反应器具有结构简单、低耗能、易清洗、混合性能好等特点, 被广泛应用于生物、化学及环境工程领域^[1-2], 特别是在污泥减量化方面得到了广泛应用^[3-4]。但气升式反应器在实际运用中多采取

经验法, 费时费力, 加上放大效应的影响, 得到的反应器结构具有一定的盲目性^[5], 而且反应器内部流体的流动机理又很复杂, 为反应器的研究工作带来了很大困难。近年来, 大量学者将计算流体力学

基金项目: 天津市自然科学基金重点资助项目(16JCZDJC39800)

通信作者: 秦松岩 E-mail: qinsongyan@vip.126.com

(CFD)运用到气升式反应器的两相流数值模拟中。

然而,对于气升式反应器气液两相流的研究多采用将液相简化为水直接进行模拟^[6-9],忽略了其他液相与水在体系物性上的差异。而液相物性参数会直接影响体系的气含率、液相速度和湍流强度^[5]。因此,笔者基于 FLUENT15.0 软件对气升式反应器气液(泥浆)两相流流动状况进行了数值模拟,探讨了液相物性条件及通气量对反应器内流动工况的影响,旨在为气升式反应器应用于污泥减量化提供参考。

1 反应器模拟

1.1 物理模型

污泥减量化中试反应器如图1所示,其底部呈四棱锥形,主体为长方体,导流筒处于长方体的中间位置,曝气器位于反应器底部,总容积为900 L,有效容积为800 L。装置整体呈对称结构,故可简化为二维计算模型。定义位置1、位置2、位置3分别为距反应器底部0、0.75、1.20 m的截面。

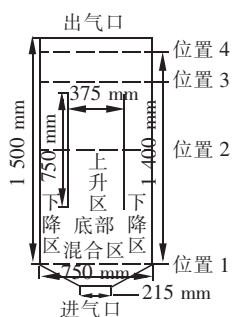


图1 气升式反应器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of airlift reactor

1.2 模拟参数

初始工况:气相为空气,密度为 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 。位置4以下为液相,液相参数:水和泥浆的温度均为 25°C ,密度分别为 997.05 、 1020 kg/m^3 ,黏度分别为 1.003 、 $4.48 \text{ g/(m} \cdot \text{s)}$,表面张力分别为 0.072 、 0.075 N/m 。

边界条件:进气口即为曝气口,操作参数采用 velocity-inlet,操作压力为 101.325 kPa ;温度为 298.15 K ;重力加速度为 9.81 m/s^2 。模拟时设置5个进气口速度,分别为 0.04 、 0.06 、 0.08 、 0.10 、 0.12 vvm ($1 \text{ vvm} = 0.03825 \text{ m/s}$);出口采用 pressure-out,出口压力为 101.325 kPa 。

计算参数:采用一阶迎风格式离散化,残差为 10^{-3} ,稳态模拟。

计算模型:采用多相流 Euler 法双流体模型和液相标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10];相间作用力只考虑曳力,曳力系数选用 Tomiyama 曳力模型^[11]。

2 结果与分析

2.1 液相介质对反应器流场的影响

本次模拟采用污泥减量化的泥浆^[3],调配至含水率为98%。黏度利用乌氏黏度计测定,表面张力利用表面张力测定仪测定。 25°C 时,该泥浆与水的黏度相差近5倍,其他参数相似。液体黏度对气含率和相关物质反应有重要影响,因此取反应器的中上部研究流场工况较为适宜^[9]。图2为位置3处液相介质对反应器流场的影响,图3为中心轴向上的湍流强度的变化。

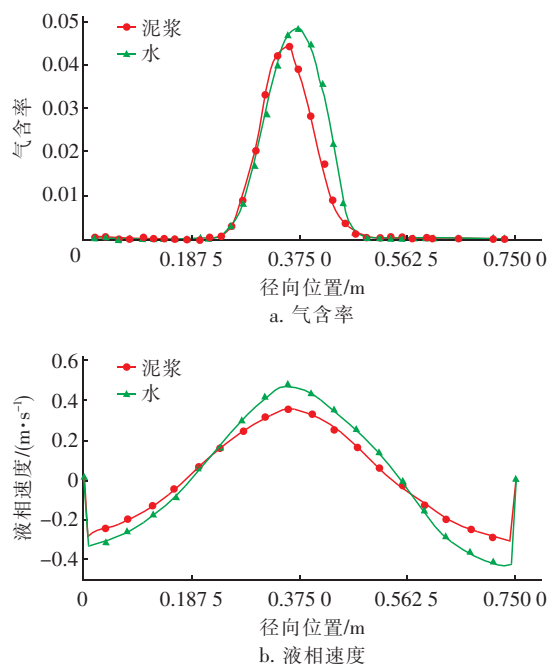


图2 位置3处液相介质对反应器流场的影响

Fig.2 Effect of liquid medium on flow field in reactor at position 3

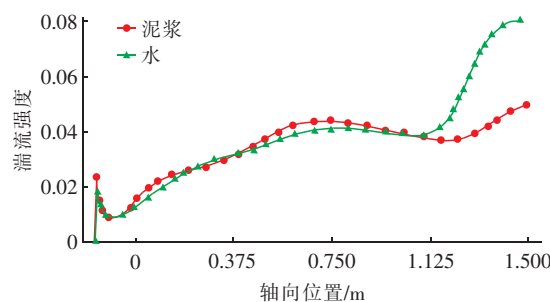


图3 中心轴向上湍流强度的变化

Fig.3 Change of turbulent intensity along center axis

由图2、3可以看出,水的气含率、液相速度和湍流强度均高于泥浆。分析认为,液相介质的黏度越高,流动性越差,气泡在黏性越高的介质中上升越不易受扰动,可形成许多不易破碎的大气泡;而在黏度较小的水中,大气泡因受扰动而破碎成小气泡,导致液相介质为水的气含率大于泥浆,众多小气泡上升又产生更大扰动,从而导致了水为液相介质时的液相速度和湍流强度高于泥浆。

图4为不同液相介质下的水速度场和气体云图。可以看出,由于黏度小的水中含众多小气泡,扰动明显高于泥浆,相较于泥浆介质中的气体在导流筒中心呈近似直线上升,水介质中气体在近导流筒处呈不规则S形上升,亦说明了泥浆的黏度越大,气泡越集聚,导致介质湍流强度、液相速度、气含率均低于水。

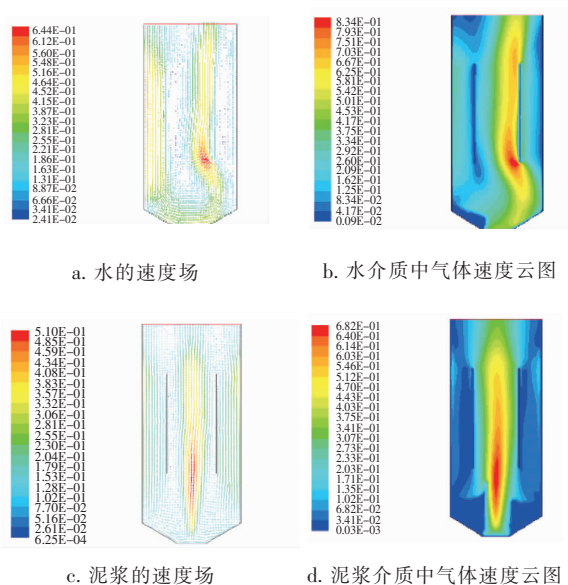


图4 不同液相介质下的水速度场和气体云图

Fig.4 Water velocity field and gas velocity image of water and slurry

2.2 通气量对反应器流场的影响

2.2.1 气含率

图5为不同位置截面处气含率沿径向的变化。可以看出,气含率在反应器中的整体分布为中间高、两侧低、导流筒壁面处为零。中间高是由于内部导流筒的导流作用引起的,大量低速气泡进入反应器,带动泥水混合物做上升运动,从而形成循环流动,其中导流筒引流使得多数气泡聚集在中心。两侧气含率的大小关系为位置3 > 位置2 > 位置1,位置1处

两侧气含率为零,这是由于该位置处于反应器底部,进来的气泡一部分逸出水面,另一部分随水的循环流动进入反应器两侧参与再次循环,只是这部分气泡难以再次到达反应器底部就会破碎。

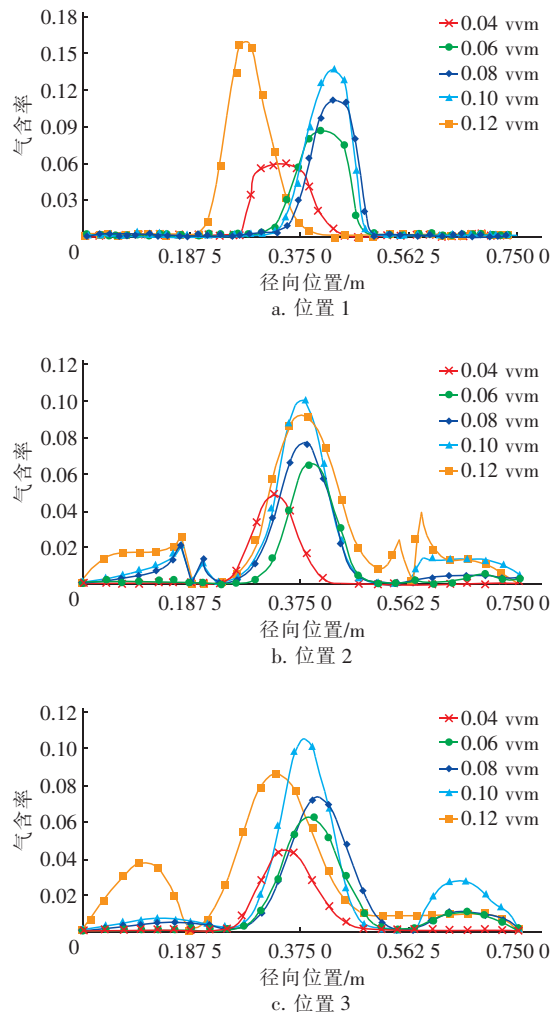


图5 不同截面处气含率沿径向的变化

Fig.5 Variation of gas hold-up along radial at different section

从图5还可以看出,位置1处反应器底部的气含率随着进气速度的增大而升高,位置2和位置3在0.10 vvm进气速度下的气含率明显大于0.12 vvm进气速度下的,分析认为当通气量高于0.10 vvm时,气速过大,导致大量气泡从水面逸出,从而使反应器上部的气含率下降,表明该气升式反应器的通气量存在适宜范围。

2.2.2 液相速度

图6为不同截面处液相速度沿径向的变化及湍流强度的变化。

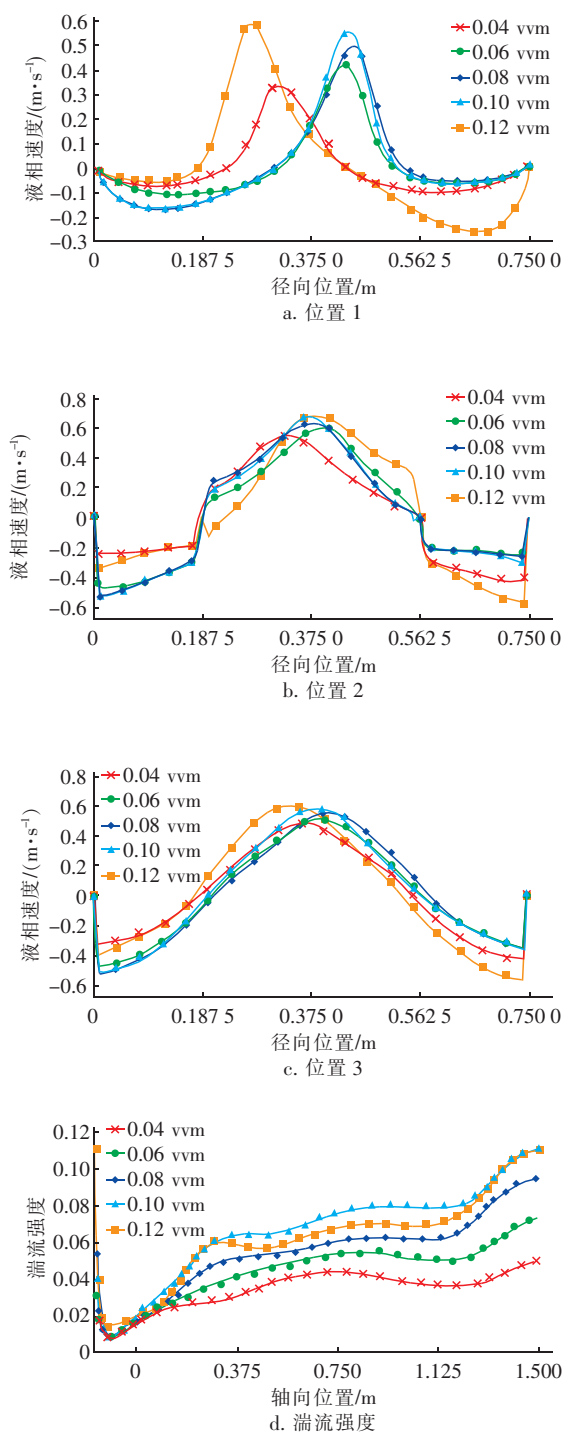


图6 不同截面处液相速度沿径向的变化及湍流强度的变化

Fig.6 Variation of liquid velocity along radial and turbulent intensity at different section

从图6可以看出,一方面液相速度在反应器中呈现中间高、两侧低、导流筒壁面为零,这一规律和气含率相吻合;另一方面,当位置升高,上升区的最

大液相速度更趋于中心化,下降区的液相速度整体为位置3 > 位置2 > 位置1,这是由于随着气泡的大量上升,上升区会有部分聚集在中心位置,导致液相速度增大,而参与下降区循环的气泡量也会变大,从而导致下降区的液相速度整体升高,且湍流强度随着通气量的增加而增大。

从图6还可以看出,位置1处随着通气量的增加,液相速度增大;位置2和位置3的液相速度则差别不大。可见,通气量对液相速度的影响在底部,而底部的气含率最低,因此在实际工程中需考虑促进底部液相速度以加大混匀程度和整体气含率,从而降低污泥停留时间。

3 结论

① 当温度为25℃时,泥浆的黏度约为水的5倍,致使泥浆的流动性变差,气含率、液相速度和湍流强度均低于水。

② 当液相介质为泥浆时,随着通气量的增加,反应器底部的液相速度、气含率均增大;反应器中上部的气含率先升后降,液相速度和湍流强度则一直增大。

参考文献:

- [1] 张立英,黄青山. 气升式环流反应器的理论研究进展[J]. 过程工程学报,2011,11(1):162-173.
Zhang Liying, Huang Qingshan. Research progress in the modeling theory of airlift loop reactor[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(1): 162-173 (in Chinese).
- [2] Merchuk J C, Siegel M H. Air-lift reactors in chemical and biological technology [J]. J Chem Technol Biotechnol, 2010, 41(2): 105-120.
- [3] 秦松岩,郭丽娜,王超,等. 生物酸化铁氧化反应器构型对污泥脱水性能的影响[J]. 中国给水排水, 2015, 31(17): 25-29.
Qin Songyan, Guo Lina, Wang Chao, et al. Effect of biological acidification and ferrous oxidation reactor on municipal sludge dewaterability [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(17): 25-29 (in Chinese).
- [4] 刘奋武,周立祥,周俊,等. 生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能的中试研究:连续运行模式[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 2993-2998.
Liu Fenwu, Zhou Lixiang, Zhou Jun, et al. Improvement of municipal sewage sludge dewaterability by bioleaching: a pilot-scale study with a continuous plug

- flow reaction model[J]. Environmental Science, 2011, 32(10): 2993–2998 (in Chinese).
- [5] 罗利佳. 内循环气升式反应器流动行为与传质特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- Luo Lijia. Study on Hydrodynamics and Mass Transfer in an Internal Loop Airlift Reactor[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012 (in Chinese).
- [6] 朱家亮, 陈祥佳, 张涛, 等. 基于CFD的内构件强化内循环流化床流场结构分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1212–1219.
- Zhu Jialiang, Chen Xiangjia, Zhang Tao, *et al.* Computational fluid dynamics simulation of hydrodynamics in an internal-loop fluidized bed reactor with a funnel-shaped internal [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1212–1219 (in Chinese).
- [7] 于兴峰, 刘永红, 蔡会勇, 等. 基于Fluent的UASB反应器流态模拟研究[J]. 中国沼气, 2016, 34(4): 41–44.
- Yu Xingfeng, Liu Yonghong, Cai Huiyong, *et al.* Simulation analysis of upflow anaerobic sludge blanket by Fluent method[J]. China Biogas, 2016, 34(4): 41–44 (in Chinese).
- [8] 陈光, 周靖. 不同孔眼数量下曝气池中气液两相流数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(6): 66–70.
- Chen Guang, Zhou Jing. Numerical simulation of gas/liquid two-phase flow in aeration tank with different aerator numbers [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(6): 66–70 (in Chinese).
- [9] 徐小姿. 基于Fluent的鼓泡塔反应器气液两相流数值模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016.
- Xu Xiaozhi. Numerical Simulation of Gas Liquid Two-phase Flow in a Bubble Column Reactor Based on Fluent[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2016 (in Chinese).
- [10] 李春丽, 田瑞, 张维蔚, 等. 气升式反应器气液两相流流态特性模拟[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12): 4333–4338.
- Li Chunli, Tian Rui, Zhang Weiwei, *et al.* Simulation on flow pattern of gas-liquid two phase flow in airlift reactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(12): 4333–4338 (in Chinese).
- [11] 李孟, 李向阳, 王宏智, 等. 鼓泡塔气液两相流不同曳力模型的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2015, 15(2): 181–189.
- Li Meng, Li Xiangyang, Wang Hongzhi, *et al.* Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in a bubble column with various drag models [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(2): 181–189 (in Chinese).



作者简介: 陈文邦(1992–), 男, 天津人, 硕士, 主要研究方向为污泥处理与处置。

E-mail: ads15468632@163.com

收稿日期: 2017–08–24

治理水土流失 建设美丽中国