

气液搅拌流场中不同通气结构的 CFD 模拟

张朝平¹, 许 涛¹, 柯昌华¹, 李艳芬²

(1. 山东山大华特环保工程有限公司, 山东 济南 250001; 2. 北京强度与环境研究所, 北京 100001)

摘 要: 使用数值模拟的方法研究了气液两相在同一种搅拌反应器、4 种不同氧化喷枪结构的流场特点, 采用 Euler-Euler 双流模型, 用 RNG $k-\epsilon$ 两方程湍流模型分析流场、多重参考系法处理搅拌桨区域, 获得了不同氧化喷枪结构的流场气含率。结果表明: 90°弯管带翼结构可以达到更好的搅拌效果, 速度场更合理, 气泡轨迹更理想, 并且在典型平面上的气含率更高。

关 键 词: 两相流; 搅拌; 氧化喷枪

中图分类号: TQ051.7; O351.3 文献标识码: A

引 言

随着烟气脱硫设施普及, 对于脱硫设施的正常运行以及节能降耗逐渐成为业界关注的重点。湿法烟气脱硫设施占据了国内脱硫市场的主要地位, 因此对湿法脱硫设施给予更多的重视将具有普遍意义。大多数湿法脱硫工艺采用通过氧化喷枪将空气鼓入吸收塔浆池内, 进而实现将亚硫酸钙强制氧化成硫酸钙, 结晶后形成石膏。由于在设计中, 氧化风机的型式已经确定, 氧化倍率一般为 2~3。在设计煤种下, 氧化风机均能良好的工作; 但由于目前各火电厂均有不同程度的缺煤现象, 特别在冬季, 煤源更是紧张, 在这种情况下, 煤种的含硫量变化较大。对于偏离设计值的高硫煤, 氧化风机的容量将不能满足系统使用要求。随着越来越多脱硫设施持续运行, 生产出越来越多的石膏, 如果强制氧化效果不佳, 将导致石膏中亚硫酸钙较多, 影响石膏的综合利用, 只能将其抛弃, 进而造成新的污染, 影响脱硫系统的正常运行。因此, 如果通过对氧化喷枪结构改进, 不仅提高氧化效率, 还可以降低氧化风机的能耗。本研究采用计算流体力学(CFD)方法, 对 4 种不同氧化喷枪进行了数值模拟, 对流场及各种结构对搅拌效果的影响进行分析。

1 数学模型和模型方法

1.1 控制方程

推导气液两相流基本控制方程时, 一般基于以下几方面的假设: 气相和液相均视为连续介质, 两相之间相互渗透, 共同占有空间区域; 任意时刻在任何小的空间内, 都可以认为被相含率为 α_g 和 α_l 的气相和液相充满; 气相为分散相, 由大小均匀的球形气泡组成, 不考虑气泡的凝并和破碎过程。

模型基本方程主要包括连续性方程和动量守恒方程, 未考虑温度变化, 所以不包括能量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho_q \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \vec{u}_q) = 0$$

$$\frac{\partial \rho_q \alpha_q \vec{u}_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \vec{u}_q \vec{u}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} +$$

$$\rho_q \alpha_q g + \sum_{p=1}^n R_{pq}$$

式中: ρ —密度; μ_q, λ_q — q 相的剪切和体积粘度; p —所有相共享的压力; $\bar{\tau}$ —第 q 相的压力应变张量; R_{pq} 是相之间的相互作用力。

1.2 湍流模型

问题采用 RNG $k-\epsilon$ 两方程湍流模式, RNG $k-\epsilon$ 模型是根据重正化群(Renormalization Group)理论, 在标准 $k-\epsilon$ 模型的基础上发展起来的改进形式。通过对粘度项的修正体现了小尺度的影响, 考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况, 因此可以更好地处理流线弯曲程度较大的流动。使得粘性方程组封闭。其关于 k 和 ϵ 的输运方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_1 \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k +$$

$$G_h - \rho_m \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\epsilon \mu_1 \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{1\epsilon} \times$$

$$\frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho_m \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon$$

式中: G_k —由于平均速度梯度而引发的湍流动能 k 的产生项; G_b —由于浮力而引发的湍流动能产生项; Y_M —在可压缩湍流流动中振荡膨胀对耗散率的贡献; 对于可压流体的流动计算中与浮力相关的系数 $C_{3\epsilon} = \tan |h\nu/u|$, 式中 ν 为平行于重力场矢量的流速分量, u 为垂直于重力场矢量的流速分量; S_k 和 S_ϵ —源项; R_ϵ —附加项, 是与 Standard $k-\epsilon$ 湍流模型之间的主要差别。

1.3 模型方法

在对搅拌反应器进行模拟时, 一个重要的问题就是解决运动的桨叶和静止的挡板之间的相互作用, 为此提出了不同的模型方法: “黑箱”模型法、内外迭代法、多重参考系法、滑移网格法、大涡模拟法。研究使用多重参考系法(MRF), 将搅拌反应器分为搅拌浆区域和浆外区域, 两个不同区域的速度匹配直接通过在交接面上的插值转换来实现。该方法的优点是对整体流场的稳态数值模拟, 计算量小, 比较适合预测桨叶与挡板相互作用较弱的体系。

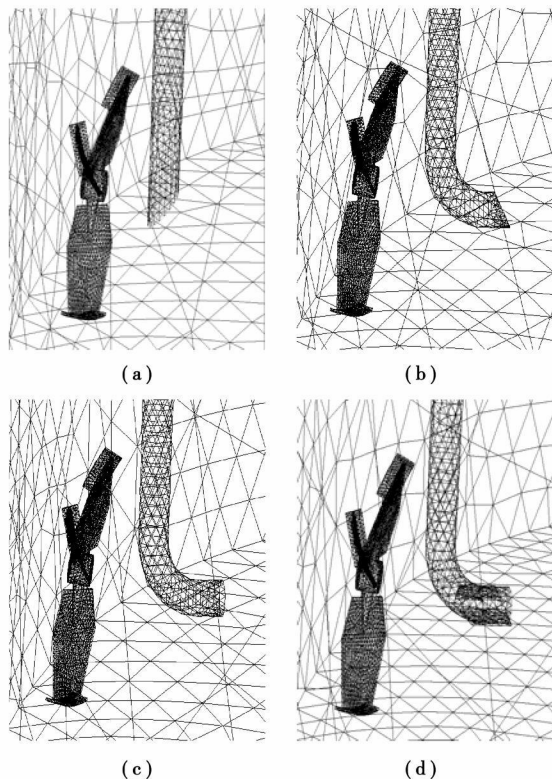


图 1 搅拌桨、4 种氧化喷枪网格

2 数值模拟

2.1 几何模型

根据工程设计, 搅拌槽直径为 10.9 m, 高度为 8.94 m; 3 个出口直径为 0.9 m, 距离槽底部为 1.048 m; 搅拌轴端距离槽底面 1.1 m, 并竖直向下偏转 10° , 水平顺时针偏转 4.6° , 搅拌桨直径为 1 m。采用 4 种氧化喷枪结构, 如表 1 所示:

表 1 4 种氧化喷枪结构

结构编号	样式	出口截面与水平面夹角/ $^\circ$	是否带翼	对应图 1 中
结构 1	直管	45	否	(a)
结构 2	90°弯管	60	否	(b)
结构 3	90°弯管	90	否	(c)
结构 4	90°弯管	90	是	(d)

2.2 网格划分及边界条件

取整个槽子为计算域。采用结构化六面体和非结构化四面体、三棱柱及金字塔型的网格相结合的方法对整个计算域进行了网格划分。为了增加计算的精确性, 对桨叶和气泡喷枪进行了网格加密处理

并省略搅拌轴, 如图 1 所示。共有约 60 万个单元网格, 如图 2 所示。

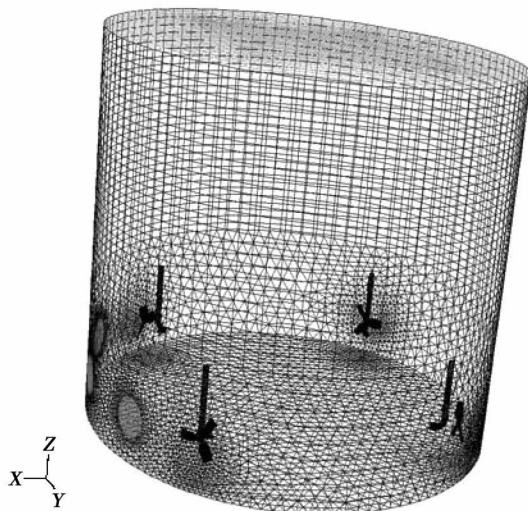


图 2 搅拌槽几何结构和网格

搅拌槽内所有固体面(除了速度入口)都设置成壁面, 对于液相采用无滑移边界, 而气相采用自由滑移边界条件; 速度入口的边界条件设置如下: $V=Q/S$, Q 为流量, S 为轴向面积; 对于出口处, 设置成压力出口, 出口压力设置成一个标准大气压; 搅拌桨转

速为 205 r/min。

2.3 数值解法

计算采用有限体积法来离散方程, 对流项的离散采用二阶迎风格式, 压力插值的方式采用 PRESTO 格式, 压力-速度耦合的方式采用 SIMPLEC 格式。湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型, 靠近壁面的区域采用标准壁面函数处理。

3 模拟结果及分析

3.1 气液搅拌槽内流场的模拟

图 3、图 4 给出了搅拌槽内 0.5 和 1 m 平面流场速度云图和矢量图。从图可看出: 通过 4 种结构的

对比, 在出口右侧的搅拌区域出现了明显的差异, 直管结构在浆区附近出现了气泡富集现象, 直接流出口, 从而使搅拌效率下降, 而 3 种 90° 弯管结构则较好的处理了这种情况, 特别是结构 4 使气泡进行了再循环, 提高了整体搅拌效率。

3.2 气体运动轨迹

图 5 给出了 4 种结构的气泡运动路径, 在水平方向出现了明显的差异, 直管结构 (结构 1) 气泡脱离管后便基本直接向上浮动, 从而使搅拌效率下降, 而 3 种 90° 弯管结构的气泡的轨迹都不同程度向中心移动, 无疑结构 4 是最明显的, 它有一部分气泡基本没有向上浮动, 从而使气液两相更好地进行了混合, 提高了搅拌效率。

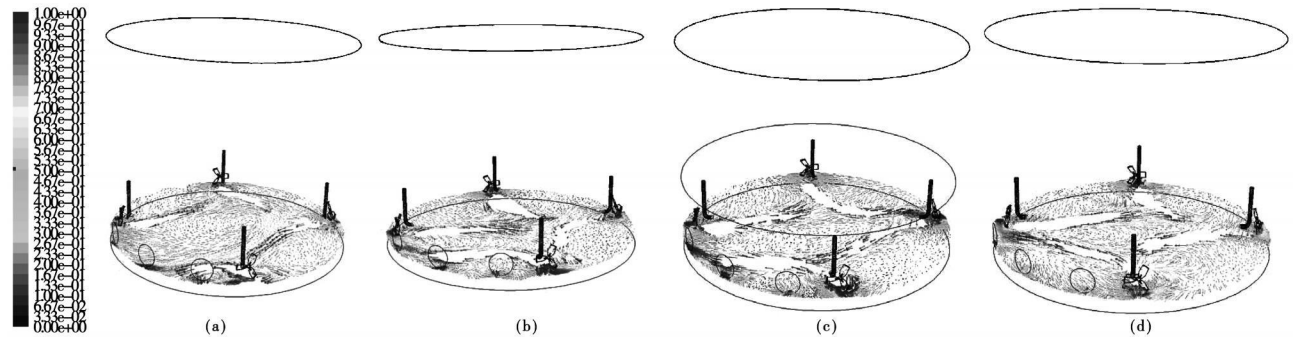


图 3 距离底部 0.5 m 平面的速度矢量图

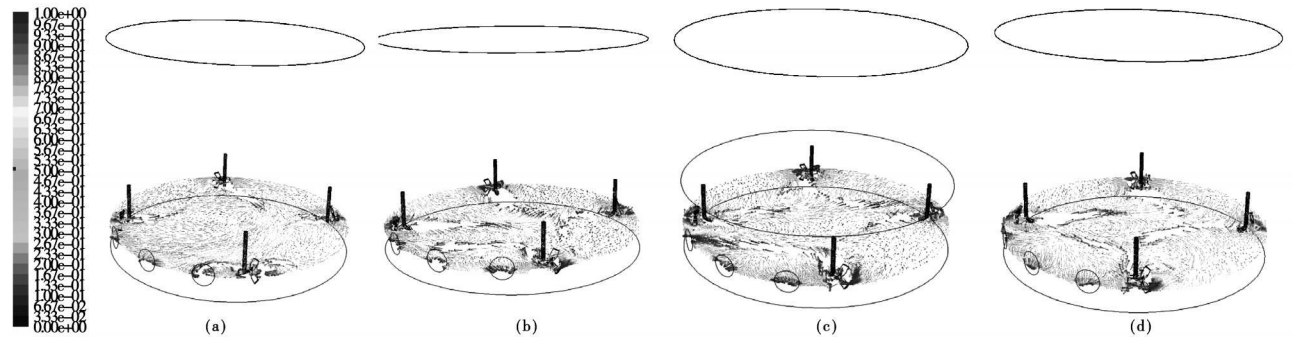


图 4 距离底部 1 m 平面的速度矢量图

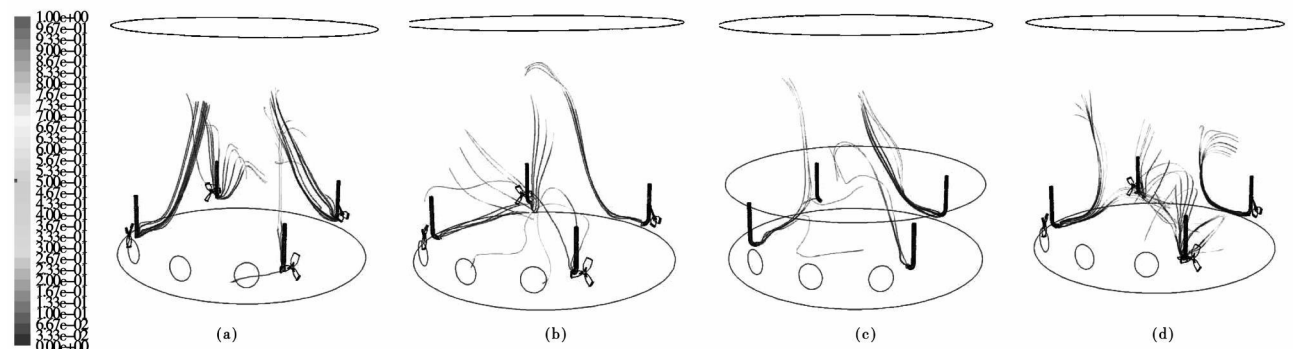


图 5 气泡运动路径图

3.3 气含率

轴向局部平均气含率是指某一高度平面的气体体积分数,它可以充分地表征气体在槽内的分布状况。图6给出了4种结构局部平均气含率和平面高度的关系曲线。从比较可以看出,在距底部0.5、1和2 m平面上,结构的截面平均气含率都要高于直管结构相应平面,而90°弯管带翼结构最高,与直管结构相比在3个平面上分别是高出17.6%、29.4%和14%。

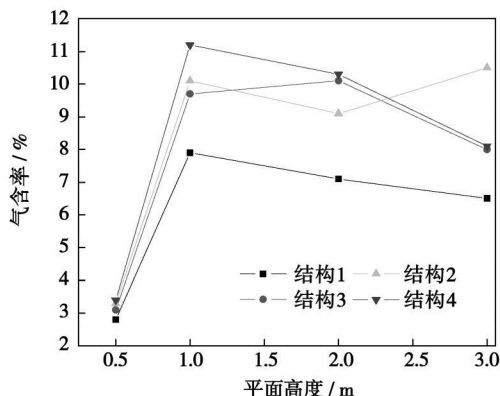


图6 平均气含率和平面高度的关系曲线

4 结 论

通过CFD仿真计算了气液两相的流场,虽然精确模拟整个过程是非常困难的,结果会受到模型选取,网格质量,计算策略等等客观条件的影响,但是通过简化的模型,也可以得到比较符合客观实际的结果。

(1) 90°弯管结构的速度场更合理。从速度云图和速度矢量图可以看出:在出口右侧的桨区,直管结构在这一区域形成了气泡富集区,从而直接流向了出口,而3种90°弯管结构则没有出现这种情况,特别是结构4使气泡进行了再循环从而提高了效率。

(2) 90°弯管的气泡轨迹更理想。从气泡路径图可以看出:90°弯管结构喷出的气泡能更广泛的参与横向螺旋流动,直管喷出的气泡很少参与这种横向运动,基本直接向上浮动。

(3) 90°弯管结构在典型平面上的气含率更高。在距底部0.5、1和2 m平面上,结构的截面平均气含率都要高于直管结构相应平面,而90°弯管带翼结构最高,与直管结构相比分别是高出17.6%、29.4%

和14%。

总体来说,计算显示了CFD方法可以很好的预测气含率在整个流场中的分布,从以上结果可以看出,在其它条件不变的情况下,从4种结构的比较来说,90°弯管带翼结构可以达到更好的搅拌效果,气含率更高。

参与本研究工作的还有徐志程、周传月。

参考文献:

- [1] 郝志刚,包雨云,高正明.多层组合桨搅拌槽内气-液分散特性的研究[J].高校化学工程学报,2004,18(5):547-552
- [2] 宋月兰,高正明,李志鹏.多层新型桨搅拌槽内气-液两相流动的实验与数值模拟[J].过程工程学报,2007,7(1):24-27.
- [3] BAO Y Y, HAO Z G, GAO Z M, et al. Suspension of buoyant particles in a three phase stirred tank[J]. Chem Eng Sci, 2005, 60: 2283-2292.
- [4] DEEN N G, VAN S A M, KUIPERS J A M. Multi-scale modeling of dispersed gas-liquid two-phase flow[J]. Chem. Eng Sci 2004, 59: 1853-1861.
- [5] GAO Z M, SMITH J M, MULLER STEINHAGEN H. Void fraction distribution in sparged and boiling reactors with modern impeller configuration[J]. Chem. Eng. Process., 2001, 40: 489-497.

(编辑 陈 滨)

· 书 讯 ·

资源回收与综合利用产品 认证与实施指南

本书主要从国际资源回收与综合利用产品认证比较分析、资源回收与综合利用产品认证模式、认证评价指标与认证质量技术研究、资源回收与综合利用产品认证质量技术研究、资源回收与综合利用产品认证风险防范体系研究等四个方面对资源回收与综合利用产品认证技术进行了阐述,如何规避风险,使认证技术体系在资源回收与综合利用产品设计、生产、销售和使用中发挥重要作用是本书的核心内容。读者对象:资源回收与综合利用产品设计和技术人员、能源管理人员、企业管理人员、认证人员等,高等院校相关专业师生。

2008年8月出版

Compared with ordinary pressure type nozzles, airflow type nozzles have such problems as easy to be worn out and a poor atomization effectiveness. However, ordinary airflow type nozzles are incapable of atomizing any gas-liquid mixture. To solve the above problem, a new type of airflow nozzle was designed by the Institute and an experimental study has been conducted of its atomization characteristics. In addition, the atomized particles and droplets were measured and analyzed. The measurement results show that under the test conditions, the particle diameters atomized by the nozzles in question are less than 50 μm and the atomization effectiveness is superior to that of ordinary airflow type nozzles. In the meantime, an analysis and study of the factors influencing atomization effectiveness have been conducted. Measurements were performed at different gas-liquid ratios. When the gas-liquid ratio increases, the atomized droplet particle diameter will decrease. At the same time, measurements were also performed at an air speed of 150 m/s and 250 m/s respectively. The greater the relative speed between the gas and liquid, the smaller the atomized droplet particle diameter. The results of the study show that the type of nozzles under discussion can atomize the gas-liquid mixture and can be applied to the alkaline solution separation in the separation towers of petrochemical industry and the water atomization for temperature reduction through water injection into a compressor. **Key words:** airflow type, nozzle, atomization, experimental study

气流搅拌流场中不同通气结构的 CFD 模拟 = **CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulation of Different Aeration Structures in a Gas-liquid Agitation Flow Field** [刊, 汉] / ZHANG Chao-ping, XU Tao, KE Chang-hua (Shandong Shanda Hua-te Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Jinan, China, Post Code: 250001), LI Yan-fen (Beijing Strength and Environment Research Institute, Beijing, China, Post Code: 100827) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 519 ~ 522

By using a numerical simulation method, studied were the features of a gas-liquid two phase flow field in a same kind of agitation reactor with four types of different oxidation spray gun structures. With a Euler-Euler dual fluid model a flow field was analyzed by adopting RNG $k-\epsilon$ two-equation turbulent flow model. A mortar agitation zone was processed by using a multiple reference system method. As a result, the air content in the flow field of different oxidation spray gun structures was obtained. It has been found that 90 degree tube-bend finned structure can be used to attain a better agitation effectiveness, a more rational velocity field, a more ideal air bubble trajectory and a higher air content on a typical surface. **Key words:** two-phase flow, agitation, oxidation spray gun

钛管 CaCO_3 污垢特性的实验研究 = **Experimental Study of CaCO_3 Fouling Characteristics of Titanium Tubes** [刊, 汉] / XU Zhi-ming, QIU Zhen-bo (Postgraduate school, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012), ZHANG Zhong-bin (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 523 ~ 526

An experimental study of titanium tube fouling characteristics was conducted, which were compared with those of stainless steel tubes and copper bare tubes. The results of the study show that the fouling induction period of the titanium tubes will increase with an increase of concentration, and decrease with an increase of flow speed. However, the law governing the change of fouling heat resistance with the concentration and flow speed is rather complicated. Under the same operating conditions, the induction period of titanium tubes is shorter than that of stainless steel tubes but longer than that of copper tubes. The fouling heat resistance asymptotic value of the titanium tubes is smaller than that of copper tubes, but bigger than that of stainless steel tubes. This indicates that the fouling resistant characteristics of titanium tubes, though superior to those of copper tubes, are inferior to those of stainless steel tubes. **Key words:** titanium tube, CaCO_3 fouling, fouling characteristics, induction period

两种内翅片管对流换热特性数值模拟 = **Numerical Simulation of Convection Heat Exchange Characteristics of Two Types of Internally-finned Tubes** [刊, 汉] / WU Feng, DENG Zhi-an, CHEN Jun-bin, HE Guang-yu (Petroleum and Gas Storage and Transportation Engineering Department, College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, China, Post Code: 710065) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 527 ~ 530

With a laminar flow model and a turbulent flow model-based numerical simulation method being adopted and in combi-