

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.04.009

双层侧进式搅拌槽固液流动研究

梁家勇, 周勇军, 卢源, 张维蒙

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

摘要: 由于对大型双层侧进式搅拌槽进行实验方法研究比较困难, 采用数值模拟的方法对其进行研究。利用计算流体动力学(CFD), 通过 gambit 建立模型并划分网格, 利用 Fluent 软件进行计算求解, 探讨不同转速下的固相分布情况, 临界离底悬浮转速、颗粒直径对临界悬浮转速的影响。结果表明固相颗粒主要分布在搅拌槽底部和双层搅拌器之间的区域, 在搅拌槽的上部区域形成一个明显的清液层, 双层侧进式搅拌器的使用可以有效地减少由于提高搅拌转速而增加的密封难度和功率消耗。

关键词: 搅拌器; 计算流体动力学(CFD); 侧进式搅拌; 固-液两相流场; 数值模拟

中图分类号: TQ027 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2895(2015)04-0035-04

Research of Solid-Liquid Flow in a Double Side-Entry Stirred Tank

LIANG Jiayong, ZHOU Yongjun, LU Yuan, ZHANG Weimeng

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Due to the difficulty of experiment for large double side entering agitation tank, numerical simulation method was used. Through computational fluid dynamics (CFD), the model was set up and grid was divided by Gambit, solution was calculated by fluent. The solid phase distribution with different speeds, the critical suspension speed of impeller, and the influence of particle diameter on critical suspension speed were investigated. The results show that the solid particles are mainly distributed between tank bottom and double stirrer, a clear liquid layer is formed on the upper part of the tank, double side entering agitator can effectively reduce increased sealing difficulty and power consumption due to the increase of stirring speed.

Key words: agitator; Computational Fluid Dynamics (CFD); side-entry impeller; solid-liquid two-phase flow; numerical simulation

近年来, 许多学者通过计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对侧进式搅拌槽内流场分布进行了研究。Gomez 等^[1]对层流状态下侧进式搅拌槽内流场进行了数值模拟, 并与 PIV 测试结果进行了对比分析。Saeed 等^[2]对侧进式搅拌槽内两相流场的固液悬浮性能进行了数值模拟。崔娜等^[3]采用数值模拟方法分析了搅拌器的安装偏角对浆液池内流场和固体颗粒悬浮状态的影响。张林进等^[4]对浆液池内单相流场进行了数值模拟。刘冠一^[5]采用数值模拟方法分析了侧入式搅拌反应器中搅拌桨转速及水平偏角对搅拌槽的流场及固体颗粒悬浮性能的影响。方键^[6]应用计算流体动力学(CFD)

方法对 4 台侧进式搅拌器的搅拌槽内的流场进行了数值模拟, 研究了不同雷诺数下搅拌器的功率准数。Tatterson^[7]的研究指出如果固相的颗粒密度与液相密度的比值大于 2 的话, 和相间曳力作用大小相比, 升力、浮力和虚拟质量力等其他相间作用力很小, 对固-液两相流场和颗粒分布影响很小。陈功国^[8]用 CFD 数值模拟方法研究了侧进式搅拌槽内不同转速、桨叶直径对流场和功率消耗的影响。但是对于具有较大的高径比如高径比大于 1.5 的搅拌浆液池, 现有的文献中未见报道。本文以某厂家所设计的一种双层多个侧进式搅拌器共同作用下具有较大的高径比的搅拌装置为背景, 通过 CFD 方法研究了搅拌槽内固液悬浮特性。

收稿日期: 2014-12-22; 修回日期: 2015-02-15

作者简介: 梁家勇(1990), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要研究方向为多相流混合技术。E-mail: 18761680336@163.com

1 几何模型

对某厂家所设计的一种双层多个侧进式搅拌器共同作用下的搅拌装置进行研究。由于模型复杂并且尺寸较大,为了便于模拟计算将模型缩小并作简化处理,其结构示意图如图1所示。

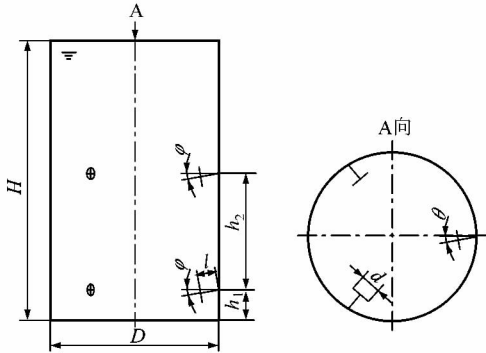


图1 侧进式搅拌槽结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of side-entry stirred tank

搅拌槽为平底圆柱体,直径 D 为 0.725 m,液位高度 H 为 1.2 m,在釜体侧面装有 2 层侧进式搅拌器,下层侧进式搅拌器安装离底高度 h_1 为 0.13 m,2 层搅拌器安装的距离 h_2 为 0.5 m,每层均布安装侧进式搅拌器 3 个,水平偏角 θ 为 5° ,竖直偏角 φ 为 10° ,搅拌轴转速 N 取 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。选用 45° 开启涡轮桨 (PBTD45),桨叶直径 d 与伸入长度 l 均取 0.1 m。工作介质为水。由于侧进式搅拌桨叶区域结构复杂,并且搅拌轴有向下和水平的偏角,模型复杂,采用非结构化四面体网格进行划分。对搅拌桨叶区域和搅拌轴进行网格加密处理,取 $1/3$ 模型进行建模和计算,网格划分约为 60 万,网格结构如图2所示。

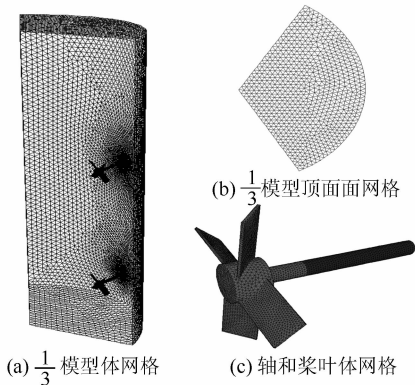


图2 模拟的网格

Figure 2 Grid graph of stirred tank

2 模拟方法

运用 Fluent 进行数值模拟,采用多重参考系法处

理搅动区域,取 Realizable κ - ε 湍流模型,壁面函数采用标准壁面函数处理,考虑重力大小。将液相设为第 1 相,固相设为第 2 相,选中 Granular,且设置颗粒直径大小;固液两相间的相间作用力选取 Gidaspow 曳力模型;计算初始时假定搅拌槽内的液相是静止不动,通过初始化的 patch 功能设定固体颗粒均匀悬浮在整个计算域内;计算残差设为 1×10^{-4} ,同时监测槽底颗粒质量分数和平均速度的大小,当其趋于稳定时认定为收敛。操作参数为:搅拌器水平偏角为 5° ,搅拌器竖直偏角为 10° ,搅拌桨转速为 $100 \sim 900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,颗粒密度为 $2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,颗粒直径为 $45 \mu\text{m}$,颗粒质量分数为 15%,液相黏度为 $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

3 结果和讨论

3.1 固相体积分数分布

为了研究固体颗粒对搅拌槽内流场分布的影响,选取不同转速下搅拌槽内轴向固相体积分数分布进行分析。图3为3种转速下搅拌槽内固体颗粒分布图。从图中可以看出,在3种不同的搅拌转速下搅拌槽上部区域都会有一个明显的清液区域,该区域内没有固体颗粒的存在。在搅拌槽底部区域,可以看出在槽体中心位置和搅拌器安装的下部区域固相体积分数较大,固体颗粒在此容易堆积。随着搅拌转速的增加,搅拌槽内最大的固相体积分数变小,颗粒悬浮得更加均匀,并且上部区域的清液层的范围明显变小,悬浮程度更接近均匀悬浮。

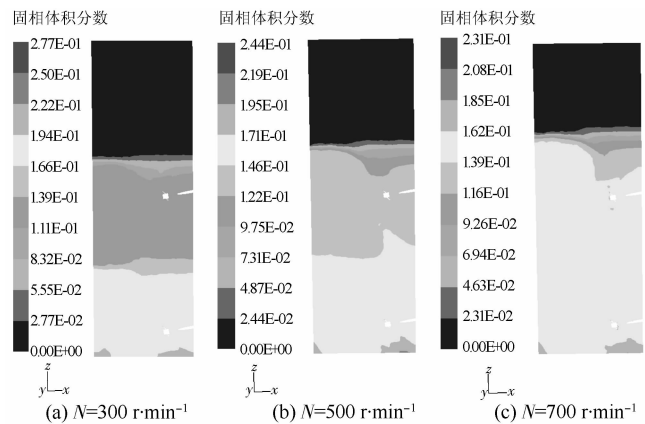


图3 固相体积分数分布云图

Figure 3 Solid concentration contours

3.2 临界离底悬浮转速

临界离底悬浮转速 N_{js} 作为判定固液搅拌槽内固体颗粒是否达到完全离底悬浮的标准。方键^[9]采用了固相体积分数标准差方法预测了搅拌槽内固体颗粒离底悬浮的临界转速,发现模拟值与试验值吻合较好,

并且发现 CFD 模拟计算出的固相体积分数标准差 $\sigma = 0.8$ 时对应的转速与 Zwietering 公式计算出的离底悬浮的临界转速一致性较好。本文选用固相体积分数标准差方法预测临界悬浮转速。

图 4 所示为不同搅拌转速时搅拌槽底部 ($z = 0.01$ m 的水平面, z 为搅拌槽竖直方向高度) 的固相体积分数标准差, 搅拌浆转速 N 取 $100 \sim 900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。从图中可以看出: 固相体积分数标准差 σ 随搅拌浆转速的增大而减小, σ 为 0.8 时所对应的转速为 $253 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 为临界悬浮转速; 当搅拌浆转速增大到 $900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, $\sigma > 0.2$, 未达到均匀悬浮状态, 可见从完全离底悬浮状态到均匀悬浮状态是一个缓慢的过程, 并且均匀悬浮时所需的搅拌转速较大。

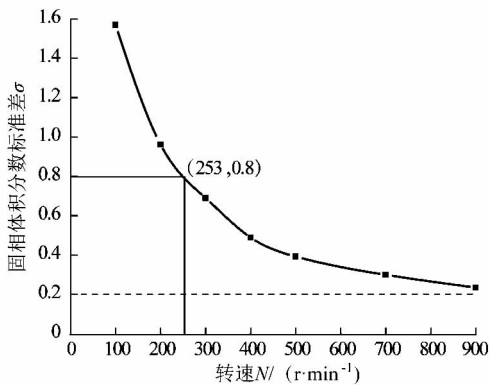


图 4 不同转速时的固相体积分数标准差

Figure 4 Standard deviation under different impeller speed

3.3 颗粒直径对临界悬浮转速的影响

为了研究搅拌槽内固相颗粒直径对临界悬浮的影响, 在颗粒质量分数 (固含量) ω 为 15% 时模拟了 4 种颗粒直径 (d_p 为 $15 \mu\text{m}$ 、 $45 \mu\text{m}$ 、 $75 \mu\text{m}$ 、 $110 \mu\text{m}$) 下的固液两相流体系。并通过采用的固相体积分数标准差方法分别获得在各颗粒直径下临界悬浮转速的大小。图 5 所示为不同颗粒直径下的临界悬浮转速。

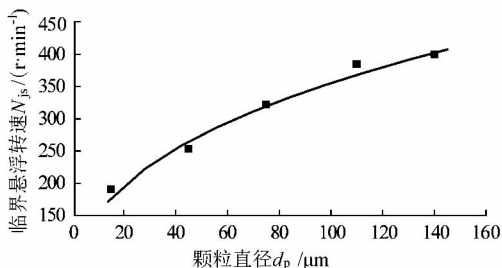


图 5 颗粒直径对临界悬浮转速的影响

Figure 5 Influence of particle diameter on critical suspension speed

从图 5 中可以看出, 随着搅拌槽内固相颗粒直径的增大, 在搅拌槽底部所要达到临界悬浮时的搅拌转速也增大, 这与单层侧进式搅拌和顶进式搅拌固液悬浮操作时是相同的。对图中的模拟结果进行拟合回归, 拟合出临界悬浮转速与颗粒直径之间的关系式为

$$N_{js} \propto d_p^{0.37} \quad (1)$$

陈佳^[10]研究了单层侧进式搅拌槽内临界悬浮转速与颗粒直径之间的关系式为

$$N_{js} \propto d_p^{0.35} \quad (2)$$

而对顶进式搅拌槽, Zwietering 提出的临界悬浮转速的计算公式 (结构参数相同且 $\omega < 20\%$) 中与颗粒直径之间的关系式为

$$N_{js} \propto d_p^{0.2} \quad (3)$$

比较公式 (1) ~ (3), 可知侧进式搅拌槽内颗粒直径对临界悬浮转速的影响比顶进式搅拌槽内的大, 公式 (1) 和 (2) 单层和双层侧进式搅拌中颗粒直径对临界悬浮转速的影响基本相同。

3.4 颗粒质量分数对临界悬浮的影响

为了研究搅拌槽内颗粒质量分数对临界悬浮的影响, 颗粒直径 d_p 为 $45 \mu\text{m}$ 时模拟了 4 种颗粒质量分数 (ω 为 5% 、 10% 、 15% 、 20%) 下的固液两相流体系。并通过固相体积分数标准差方法获得在各颗粒的质量分数下临界悬浮转速的大小。图 6 所示为不同颗粒的质量分数所对应的临界悬浮转速。可以看出, 随着搅拌槽内颗粒质量分数的增大, 临界悬浮转速也相应地增大, 这与单层侧进式搅拌槽内固液悬浮操作时是相同的。对图 6 中的模拟结果进行拟合回归, 拟合出临界悬浮转速与颗粒质量分数之间的关系式

$$N_{js} \propto \omega^{0.31} \quad (4)$$

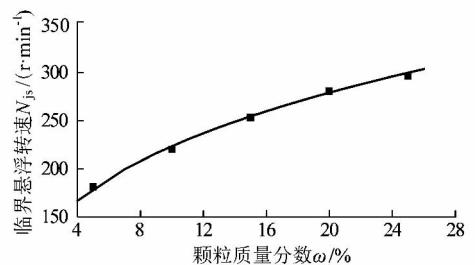


图 6 颗粒的质量分数对临界悬浮转速的影响

Figure 6 Effect of solid content on critical suspension speed

方键利用实验和数值模拟方法研究了单层侧进式搅拌槽内临界悬浮转速与颗粒质量分数之间的关系式为

$$N_{js} \propto \omega^{0.27} \quad (5)$$

比较公式(4)与(5),可知双层与单层侧进式搅拌槽内颗粒质量分数对临界悬浮转速的影响基本相同,比单层时的稍大一点。

3.5 固相悬浮高度

在对搅拌槽内固液两相流进行研究时,当搅拌槽高径比较大且槽内固相质量分数较大时,在搅拌槽的上部区域固相颗粒的质量分数较小,会形成一段明显的清液区域,用固相悬浮高度 h 表示清液层分界面到搅拌槽底部的距离。

图7所示为转速对搅拌槽固相悬浮高度的影响,分别对固相悬浮高度和转速进行无量纲化处理。从图中可以看出随着搅拌转速的增加,固相悬浮高度 h 也随之增大。陈佳利用实验和数值模拟方法分别研究了单层侧进式搅拌的固相悬浮高度,结果表明当达到临界悬浮转速时固相悬浮高度约在 $0.42H$ 处。此时上层清液层区域较大,不能满足工业要求,唯有提高搅拌转速来增加固相悬浮高度,但这样会加大侧进式搅拌器的功率消耗和密封难度。而本文采用双层侧进式搅拌器,在临界悬浮转速时所对应的固相悬浮高度达到了 $0.67H$,可以有效地提高固相悬浮高度。要达到相同的固相悬浮高度,双层侧进式搅拌器的可以有效地减小搅拌器的密封难度和功率消耗。

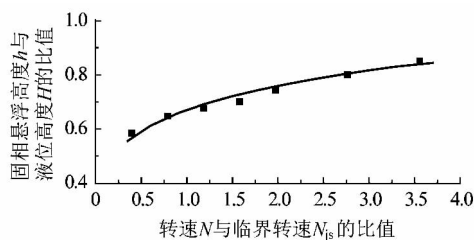


图7 转速对固相悬浮高度的影响

Figure 7 Effect of impeller speed on solid suspension height

4 结论

1) 双层侧进式搅拌器内,固相颗粒主要分布在搅拌槽底部和双层侧进式搅拌器之间的区域;在搅拌槽

的上部区域,液相的流速较小,固体颗粒分布得较少,在上部区域形成一个明显的清液层。

2) 通过固相体积分标准差方法测定给定操作工况下的临界离底悬浮转速为 $253 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$;并分别分析了固相颗粒直径、颗粒质量分数对临界悬浮转速的影响,分别拟合出与临界悬浮转速的关系式,发现双层与单层侧进式搅拌槽内固相颗粒直径、颗粒质量分数对临界悬浮转速的影响基本相同。

3) 双层侧进式搅拌器内,达到临界悬浮转速时的固相悬浮高度为 $0.67H$,比单层时的固相悬浮高度 $0.42H$ 要高;要达到相同的固相悬浮高度,双层侧进式搅拌器的使用可以有效地减少由于提高搅拌转速而增加的密封难度和功率消耗。

参考文献:

- [1] GOMEZ C, BENNINGTON C P J, TAGHIPOUR F. Investigation of the flow field in a rectangular vessel equipped with a side-entering agitator [J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(5): 1-13.
- [2] SAEED S, EIN-MOZAFFARI F, UPRETI S R. Using computational fluid dynamic modeling and ultrasonic doppler velocimetry to study pulp suspension mixing [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007, 46(7): 2172-2179.
- [3] 崔娜, 周国忠, 李伟, 等. 烟气脱硫吸收塔底部浆液池内流场特性的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺, 2009, 25(2): 126-131.
- [4] 张林进, 陈功国, 叶旭初. 侧进式搅拌反应器内流场的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺, 2011, 27(2): 97-102.
- [5] 刘冠一. 侧入式搅拌中固液悬浮的数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [6] 方键, 桑之富, 杨全保. 侧进式搅拌器三维流场的数值模拟[J]. 石油机械, 2009, 37(1): 30-34.
- [7] TATTERSON G B. Fluid mixing and gas dispersion in agitation tanks [M]. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [8] 陈功国, 张林进, 柏杨, 等. 侧入式搅拌槽中浆液参数对流场及功率影响的数值模拟[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2012, 37(6): 29-34.
- [9] 方键. 侧进式搅拌槽内多相流动与混合性能的研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2012: 12-13.
- [10] 陈佳. 侧进式搅拌反应器内均相及多相流体动力学的数值模拟[D]. 上海: 华东理工大学, 2012: 32-35.