

轻密度颗粒在搅拌槽内悬浮特性的数值模拟

李良超, 杨军, 徐斌

(西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室, 绵阳 621010)

摘要: 轻密度颗粒在搅拌槽内的悬浮特性是其在工业应用中非常关键的问题。该文采用多重参考系 (multiple reference frame, MRF) 法和以颗粒动力学为基础的 Euler-Euler 双流体模型, 对轻密度颗粒在双层圆盘涡轮桨搅拌槽内的悬浮特性进行数值模拟, 得到了槽内的宏观流动场和固含率分布等, 采用文献试验数据对模拟结果进行了验证。结果表明: 总体上轻密度颗粒固含率分布沿轴向高度增大而增大, 并存在分区现象, 在液面中心处颗粒浓度最高, 颗粒易在此处堆积, 而在槽底中心处则固含率最低。在循环涡涡心和桨叶后部, 颗粒浓度相对较高。轻密度颗粒的加入使搅拌槽内液相速度略有降低。搅拌转速增加或颗粒粒径减小有利于颗粒的均匀悬浮, 颗粒含量的变化对固液悬浮的均匀性影响不大。该研究可为轻密度颗粒悬浮搅拌反应釜设计、优化和放大等提供参考。

关键词: 数值分析, 液体, 固体, 悬浮, 搅拌槽, 轻密度颗粒, 两相流

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.16.006

中图分类号: TQ027.3⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-16-0042-08

李良超, 杨军, 徐斌. 轻密度颗粒在搅拌槽内悬浮特性的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 42-49.
Li Liangchao, Yang Jun, Xu Bin. Numerical simulation of solid-liquid suspension characteristics for low-density particles in stirred vessel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 42-49. (in Chinese with English abstract)

0 引言

固液体系搅拌槽在工业、农业过程中应用广泛, 常见的固液悬浮操作是将密度比液相重的下沉颗粒从槽底悬浮起来, 但在工业应用中还存在着一些轻密度颗粒, 其密度较液相低, 需要很大的下拉力才能将其从液面下拉到液流主体中实现颗粒悬浮。例如在一些农作物加工或农业固体废弃物处理过程中, 需要将轻密度的生物质颗粒通过机械搅拌分散到液体中, 实现固液均匀悬浮。文献中对下沉颗粒的悬浮特性研究较多^[1-8], 但对轻密度上浮颗粒的悬浮特性研究则少见报道, 仅有部分作者^[9-12]对轻密度颗粒固液搅拌槽内搅拌功率、液相混合过程等进行了研究。文献[13]指出, 轻密度颗粒与下沉颗粒的悬浮特性有很大的差别。因此有必要对轻密度颗粒在搅拌槽内的悬浮特性进行深入研究。

近年来, 随着计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术及其软件的迅速发展, 数值模拟逐渐成为研究搅拌反应器的重要手段。有较多作者对下沉颗粒的固液悬浮特性进行了数值模拟

研究^[14-19]。本文采用 CFD 的方法对轻密度颗粒在搅拌槽内颗粒悬浮特性进行数值模拟, 考察了轻密度颗粒悬浮搅拌槽内速度场、固体浓度分布规律等, 以期对涉及轻密度颗粒悬浮的搅拌反应器设计、优化和放大等提供参考。

1 模拟对象

1.1 计算域

模拟的搅拌槽和搅拌桨结构如图 1 所示, 采用内径 T 为 0.294 m 的平底搅拌槽, 槽内均匀分布 4 块挡板, 挡板宽 $T/10$, 距槽壁 5 mm。计算的液固两相体系为常温水 and 聚丙烯细颗粒, 聚丙烯的密度为 900 kg/m^3 , 直径 d_s 在 0.25~0.5 mm 之间, 液位高 $H=T$, 采用直径 D 为 $T/3$ 的双层六直叶圆盘涡轮桨对槽内固体颗粒进行悬浮, 上、下层桨离底高度 C_1 、 C_2 分别为 $0.75T$ 和 $0.25T$ 。根据流体流动的周期性对称, 由 2 挡板中间垂直截面将槽体剖为两半, 选取其中的一半作为计算域。

1.2 网格划分

将搅拌槽体分为静止区域和桨叶旋转区域两部分, 桨叶旋转区域为直径 $D_0=0.58T$, 高度分别为 $0.105T \leq h_1 \leq 0.395T$, $0.605T \leq h_2 \leq 0.895T$ 的 2 圆柱体包含的区域, 其内有上、下层搅拌桨, 其余部分为静止区域。对 2 区域采用 Fluent 前处理网格生成软件 Gambit2.2 分别划分非结构化四面体网格。为增加计算的精确度, 对液面、搅拌桨、动静区域交

收稿日期: 2013-02-19 修订日期: 2013-07-12

基金项目: 西南科技大学博士基金项目 (11zx7162)

作者简介: 李良超 (1976-), 男, 讲师, 博士, 主要从事多相流体混合和液压元件的研究。绵阳 西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室, 621010。Email: tchllc@126.com

界面和挡板等重要部位进行网格加密处理。网格总数为 677 455 个，经试算比较，再增加网格数量对模拟结果已基本没有影响。

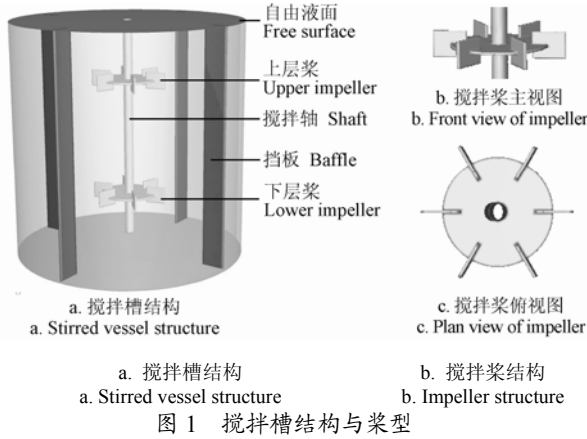


Fig.1 Schematic drawing of stirred vessel and impeller

2 模拟方法

2.1 基本控制方程

目前对固液两相流模拟^[20-22]有 3 种方法，即 Euler-Lagrange 法、Euler-Euler 法和 Lagrange-Lagrange 法。其中 Euler-Euler 法将颗粒和流体都看作连续介质，颗粒和流体共同存在且相互渗透，同在 Euler 坐标系下处理，即 Euler-Euler 双流体模型。该模型物理概念清晰，计算量较小，适合低颗粒浓度和较高颗粒浓度的固-液两相流计算。本文采用 Euler-Euler 双流体模型对搅拌槽内的固液悬浮特性进行数值模拟。在不考虑温度变化时，双流体模型包含的质量守恒方程和动量守恒方程分别为

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i) + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i v_i) = 0, \sum \alpha_i = 1.0 \quad (1)$$

液相动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l v_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l v_l v_l) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \tau_l + k_{ls}(v_s - v_l) + \alpha_l \rho_l g \quad (2)$$

固相动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s v_s v_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \tau_s + k_{ls}(v_l - v_s) + \alpha_s \rho_s g \quad (3)$$

$$\tau_s = a_s \mu_s (\nabla v_s + \nabla v_s^T) + a_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \cdot v_s \quad (4)$$

式中， ρ_i 为 i 相流体密度， kg/m^3 ； i 为 i 相，用 l 表示液相， s 表示颗粒相； α_i 为 i 相流体体积分率，也称 i 相含率； v_i 为 i 相流体的时均速度， m/s ； t 为流动时间， s ； p 为相压力， Pa ； k_{ls} 为相间曳力系数。 τ_s 为颗粒相剪切应力张量， Pa ； λ_s 为颗粒的动力黏

度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； μ_s 为颗粒相剪切黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； p_s 为颗粒相压力， Pa 。

2.2 颗粒动力学模型

式 (3) 和式 (4) 中颗粒相剪切应力张量 τ_s ，与颗粒动力黏度 λ_s 、颗粒剪切黏度 μ_s 及颗粒压力 p_s 等密切相关，需要引入颗粒温度概念的颗粒动力学模型对其进行计算。

颗粒温度 Θ 反映的是颗粒间碰撞而引起的颗粒速度脉动，定义为

$$\Theta = \frac{1}{3}(\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2) \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sqrt{(v_j - v_s)^2} \quad (6)$$

式中， σ_r ， σ_θ ， σ_z 为 r ， θ 和 z 方向颗粒脉动速度， m/s ； v_j 为 j 瞬时颗粒速度， m/s ； n 为统计瞬间数量。

对于弹性球体碰撞，颗粒温度方程为

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \Theta) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \Theta v_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \tau_s) : \nabla v_s + \nabla \cdot (k_0 \nabla \Theta) - \gamma_s \quad (7)$$

式中， \bar{I} 为单位张量； k_0 为能量传递系数； γ_s 为碰撞能量耗散系数。 k_0 和 γ_s 表达式分别为

$$k_0 = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{\pi \Theta}}{384(1+e)g_0} \left[1 + \frac{6}{5} g_0 \alpha_s (1+e) \right]^2 + \quad (8)$$

$$2 \alpha_s^2 \rho_s d_s (1+e) g_0 \left(\frac{\Theta}{\pi} \right)^2 \quad (9)$$

$$\gamma_s = \frac{12(1-e^2)g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \Theta^{3/2}$$

g_0 为径向分布函数，其作用是对颗粒在径向上分布的修正因子，表达式为

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{a_s}{a_{s,\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (10)$$

颗粒压力 p_s 为

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta + 2 \alpha_s^2 \rho_s (1+e) g_0 \Theta \quad (11)$$

颗粒相动力黏度 λ_s

$$\lambda_s = \frac{4}{3} a_s \rho_s d_s (1+e) g_0 \left(\frac{\Theta}{\pi} \right)^{1/2} \quad (12)$$

颗粒相剪切黏度 μ_s

$$\mu_s = \frac{a_s \rho_s d_s \sqrt{\pi \Theta}}{6(3-e)} \left[1 + \frac{2}{5} (1+e)(3e-1) g_0 a_s \right] + \quad (13)$$

$$\frac{4}{5} a_s \rho_s d_s (1+e) g_0 \left(\frac{\Theta}{\pi} \right)^{1/2}$$

另外，对液相流体的湍动计算采用 RNG- $k-\epsilon$ 湍流模型，固液间的相互作用采用 Wen-Yu 曳力系数

模型^[23], e 为颗粒间相互碰撞恢复系数, 其反映了颗粒碰撞时的变形恢复能力, e 值为 0.9^[24]。

2.3 初始条件与边界条件

采用计算流体力学软件 Fluent6.2 对搅拌槽内固-液两相流场进行数值模拟。假设在初始态时颗粒均匀悬浮在搅拌槽内, 液相水为黏性不可压缩流体。采用非稳态计算, 直到搅拌槽内速度场和浓度场都不再随时间变化为止, 收敛残差达 10^{-5} 以下。

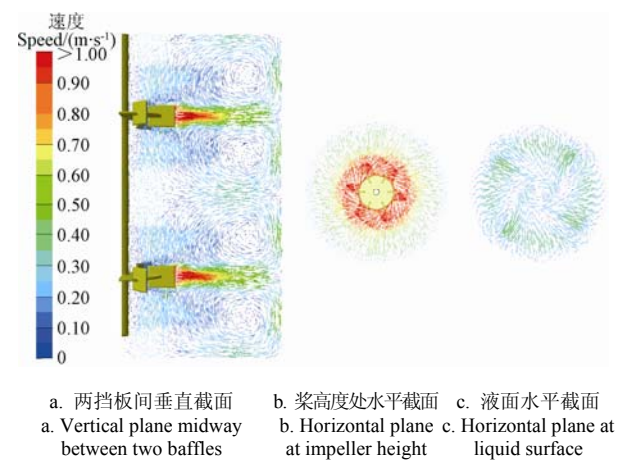
液面采用自由滑移壁面条件, 即液相和固体颗粒在液面都能自由滑移。对槽壁、挡板、桨叶片和搅拌轴等固体边界, 液相采用无滑移边界条件, 近壁区采用标准的壁面函数处理, 对固体颗粒在这些边壁处的运动采用部分滑移边界条件, 引入壁面恢复系数, 对颗粒在边壁处的运动进行描述。叶轮旋转区域和其他静止区域采用多重参考系法 (multiple reference frame, MRF) 处理, 旋转区域在旋转参考系下计算, 旋转速度即为搅拌转速, 静止区域在静止坐标系下计算。两区域间的质量、动量和能量交换通过交界面进行。采用基于压力的隐式求解器, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法, 离散格式采用一阶迎风格式。

3 结果与分析

3.1 速度场

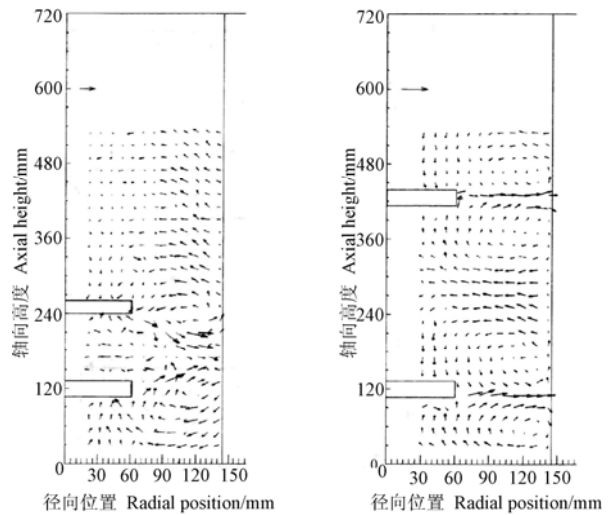
3.1.1 宏观速度场

双层圆盘涡轮桨搅拌槽内不同截面的液相速度场如图 2 所示。圆盘涡轮桨为径向流桨, 对双层径向流桨, 文献[25]用激光多普勒法 (laser doppler anemometry, LDA) 测量搅拌槽内流场得出, 槽内的流型和桨间距 C_0 密切相关, 随着 2 桨间距的增加, 分别呈现合并流和平行流等流型 (如图 3),



注: 搅拌转速 $N=250$ r/min; 以水为介质的单相流。
Note: Stirring speed is $N=250$ r/min; Single-phase flow with water as medium.

图 2 不同截面液相速度分布
Fig.2 Liquid velocity vectors in different planes



a. 连接流 ($C_0=T/3$)
a. Merging flow ($C_0=T/3$)
b. 平行流 ($C_0=8T/9$)
b. Parallel flow ($C_0=8T/9$)

注: 以水为介质的单相流, 结果引自参考文献[25]。
Note: Single-phase flow with water as medium.

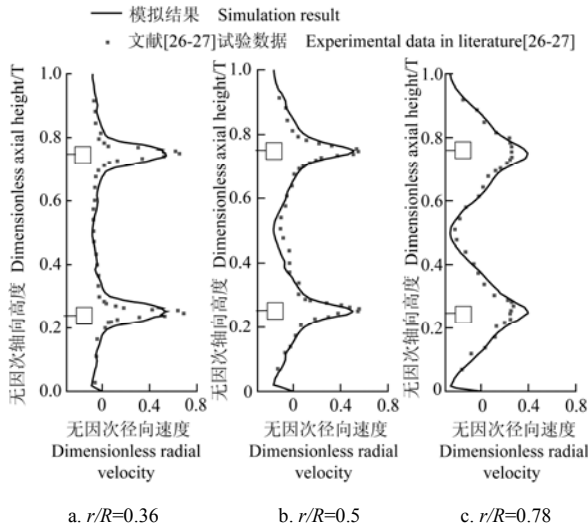
图 3 搅拌釜内流型的试验结果
Fig.3 Experimental results of flow pattern in stirred vessel

当层间距大于或等于半个槽径时, 上、下层桨间的循环流相互影响较小, 形成平行流, 在每层桨区各自产生上下 2 个涡环。本文模拟的搅拌槽桨间距为 0.5 倍槽径, 为平行流, 搅拌槽内形成了 4 个循环涡, 并且在涡环的涡心位置流速很低, 模拟结果和文献[25]结论一致 (如图 3b)。由图 2b 可以看出, 在叶轮区流体流速较高, 随着离叶轮渐远, 流速逐渐降低。由图 2c, 在液面区域流体流动方向为从边壁向槽体中心流动, 由于搅拌轴的旋转带动作用, 在槽体中心流体绕轴形成漩涡流动。

3.1.2 液相速度分布

图 4 为数值模拟的单相流时 2 挡板间液相无因次径向速度分布 (径向矢量速度与桨叶端速度 v_{tip} 比值, 以径向增大的方向为正方向) 与文献[26-27]试验数据的比较。由图 4 可以看出, 数值模拟结果和文献试验值吻合较好, 说明采用本文的模拟方法能对搅拌槽内流场进行很好的预测, 验证了模拟的可靠性。

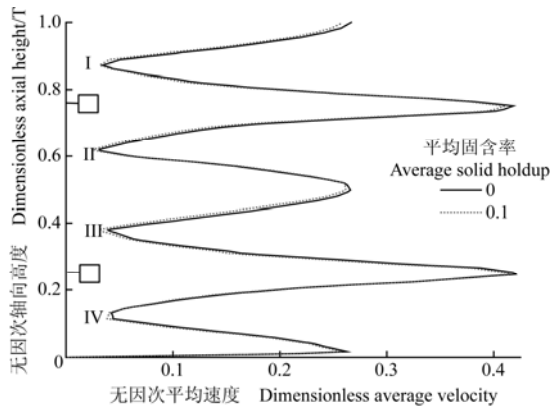
图 5 为在 $r/R=0.78$ 处, 单相流和平均固含率为 0.1 的两相流时, 液相合速度大小的轴向分布比较。由图 5 可以看出, 液相合速度在叶轮高度处最大, 另外, 在 I, II, III 和 IV 高度处液相合速度有极小值, 这是因为 $r/R=0.78$ 的轴线正好经过循环涡心附近, 而涡心处流速很低 (如图 2)。由于颗粒的粒径小, 密度和液相水很接近, 颗粒的加入对液相合速度影响不大, 加入轻密度颗粒后, 液相合速度略有降低。



注：搅拌转速为 $N=250$ r/min; r 为测量点径向位置, m ; R 为搅拌槽半径, m ; 以水为介质的单相流。
Note: Stirring speed is $N=250$ r/min; is radial position of measurement points, m ; is radius of the stirred tank, m ; single-phase flow with water as medium.

图 4 两挡板间径向速度分布数值模拟值与文献[26-27]数据比较

Fig.4 Comparison of radial velocity simulated results with literature's value^[26-27] in vertical plane midway between baffles at three different radial positions



注：I~IV 为四循环涡心高度；径向位置为 $r/R=0.78$ ；搅拌转速为 $N=250$ r/min。

Note: I~IV is axial height of four circulation loops centre; radial position is $r/R=0.78$; Stirring speed is $N=250$ r/min.

图 5 两挡板间单相流和固液两相流液相速度轴向分布

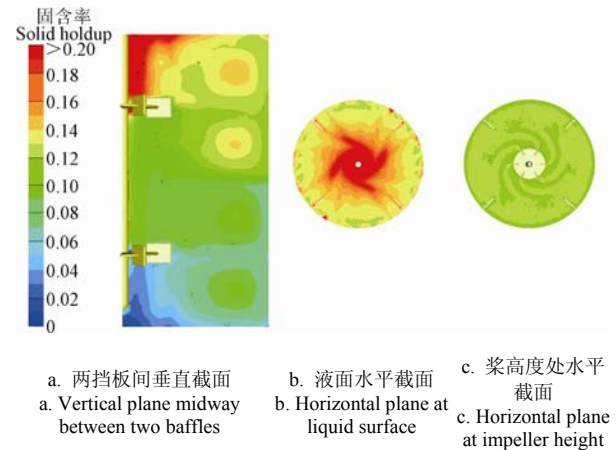
Fig.5 Average velocity of single-phase and solid-liquid two-phase flow in vertical plane midway between two baffles

3.2 固含率

3.2.1 固含率分布

在本文所有模拟工况下，模拟的槽内最大固含率都低于颗粒堆积需要的最小固含率 $0.52^{[28]}$ ，所以槽内无颗粒堆积发生。在搅拌转速 $N=250$ r/min，平均固含率 $\bar{\alpha}_s=0.1$ 工况下，搅拌槽内不同截面固含率分布如图 6 所示。总体上，固含率沿轴向高度的增加而增大，并有分区现象。在液面中心处固含率最高，说明对于轻密度颗粒的固液悬浮，颗粒在该处的悬浮效果最差，最容

易在此处形成堆积。与液面处相反，在槽底中心区固含率最低，由于轻密度颗粒的上浮作用，随流体循环到该区域的颗粒量较少。在循环涡的涡心处，固含率相对较高，这主要是因为涡心处液相流速很低，颗粒随流体运动到涡心处停留时间长，以及漩涡对不同密度流体有离心分离作用，导致轻密度颗粒在该处易聚集。在桨叶片的迎流面，颗粒的固含率较低，而在其背流面固含率则相对较高，这可能为叶轮搅拌时，叶片后部流体压力低，在压差的推动下，轻密度颗粒易在叶片后部聚集所致。如图 6 所示，固含率在轴向上也有一定的分区现象，以轴向高度 $h=0.5T$ 附近为界，在此以上区域的固含率明显比其以下区域高得多。结合图 2 搅拌槽内流场，固含率的这种轴向分区现象可能与搅拌槽内两桨间距较大，上、下层桨间的循环流相互间影响较小，而导致流场有分区密切相关。



注：搅拌转速为 $N=250$ r/min；平均固含率为 $\bar{\alpha}_s=0.1$ ；颗粒粒径为 $d_s=0.5$ mm。
Note: Stirring speed is $N=250$ r/min; average solid holdup is $\bar{\alpha}_s=0.1$; particles size is $d_s=0.5$ mm.

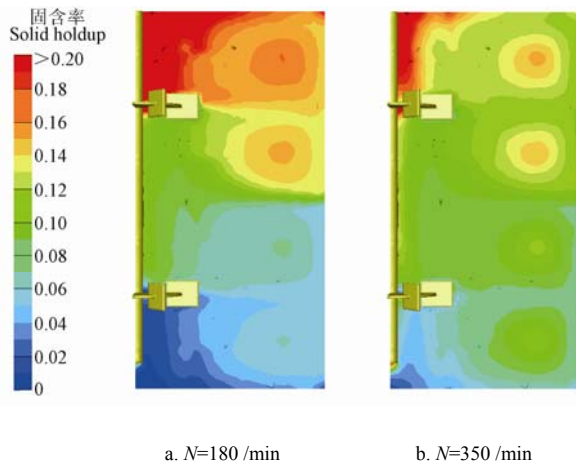
图 6 不同截面固含率分布
Fig.6 Solid holdup distribution in different planes

3.2.2 搅拌转速对固含率分布影响

图 7 显示了搅拌转速对搅拌槽内轻密度颗粒固含率分布的影响。可以看出，搅拌转速增加，液面和上部区域的固体颗粒浓度明显减少，而中下部区域的固含率增大，说明搅拌转速提高将更多的轻密度颗粒下拉到槽中下部区域，有利于固体颗粒的均匀悬浮。

图 8 定量地分析了不同搅拌转速下，在 $r/R=0.78$ 处局部固含率的轴向分布。局部固含率在叶轮高度处相对较低，而在各叶轮高度的上下位置则分别出现两峰值，结合图 2 和图 6，这主要是因为 $r/R=0.78$ 轴线经过流体循环涡附近，如前所述，在该位置颗粒浓度较高。以 $h/T=0.5$ 高度附近为分界面，局部固含率随搅拌转速呈

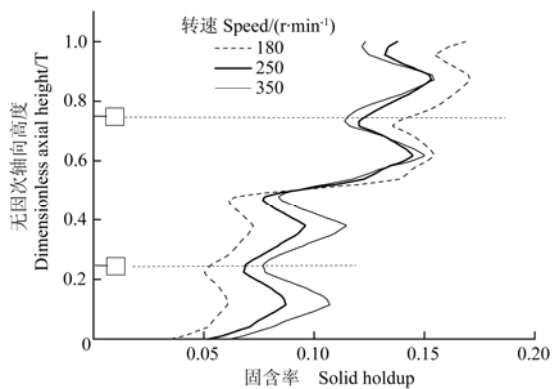
现不同的变化趋势, 在 $h/T=0.5$ 以上区域局部固含率随着搅拌转速的增加而减小, 而在 $h/T=0.5$ 以下区域则相反。说明搅拌转速增加使颗粒悬浮更均匀。



注: 平均固含率为 $\bar{\alpha}_s=0.1$; 颗粒粒径为 $d_s=0.5$ m。
Note: Average solid holdup is $\bar{\alpha}_s=0.1$; particles size is $d_s=0.5$ m.

图 7 不同搅拌转速下垂直截面固含率分布

Fig.7 Solid holdup distribution in vertical plane for different impeller speeds



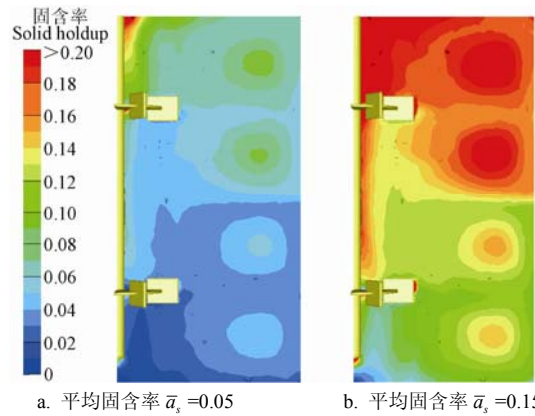
注: 径向位置为 $r/R=0.78$; 平均固含率为 $\bar{\alpha}_s=0.1$; 颗粒粒径为 $d_s=0.5$ mm。
Note: Radial position is $r/R=0.78$; average solid holdup is $\bar{\alpha}_s=0.1$; particles size is $d_s=0.5$ mm.

图 8 不同搅拌转速下固含率轴向分布

Fig.8 Axial solid holdup distribution for different impeller speeds

3.2.3 颗粒含量对固含率分布影响

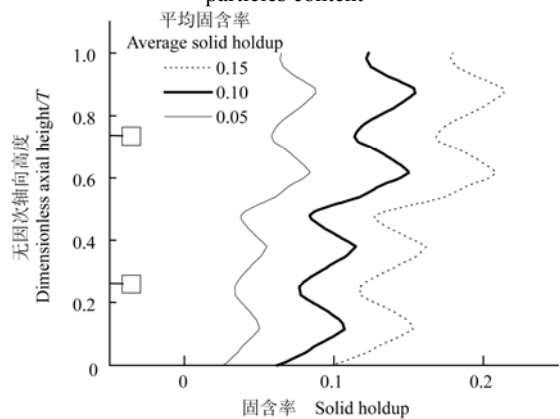
图 9 和图 10 考察了颗粒含量对固含率分布的影响。在较低的平均固含率下 ($\bar{\alpha}_s=0.05$), 局部固含率分布依然在轴向高度上有明显分区现象。随着平均固含率增大, 在 $r/R=0.78$ 处各局部固含率几乎按平均固含率相应比例增大, 局部固含率增大幅度在液面区只比在槽底区有很不明显的略大。说明颗粒含量增加, 可以使搅拌槽内不同区域的局部固含率增大, 但对固含率分布的均匀性影响不是很明显。



注: 搅拌转速为 $N=350$ r/min; 颗粒粒径为 $d_s=0.5$ mm。
Note: Stirring speed is $N=350$ r/min; particles size is $d_s=0.5$ mm.

图 9 不同颗粒含量下垂直截面固含率分布

Fig.9 Solid holdup distribution in vertical plane for different particles content



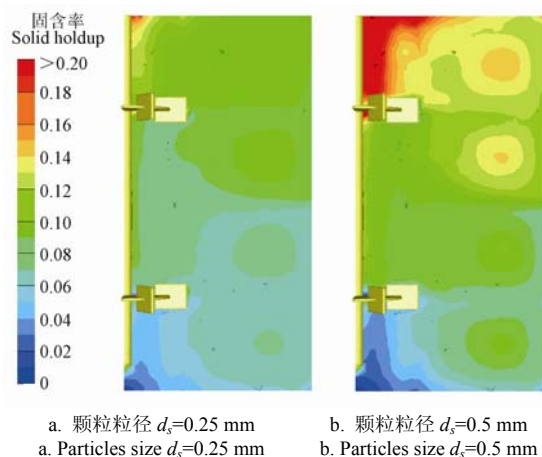
注: 径向位置为 $r/R=0.78$; 搅拌转速为 $N=350$ r/min; 颗粒粒径为 $d_s=0.5$ mm。
Note: Radial position is $r/R=0.78$; stirring speed is $N=350$ r/min; particles size is $d_s=0.5$ mm.

图 10 不同颗粒含量下固含率轴向分布

Fig.10 Axial solid holdup distribution for different solid concentration

3.2.4 颗粒粒径对固含率分布影响

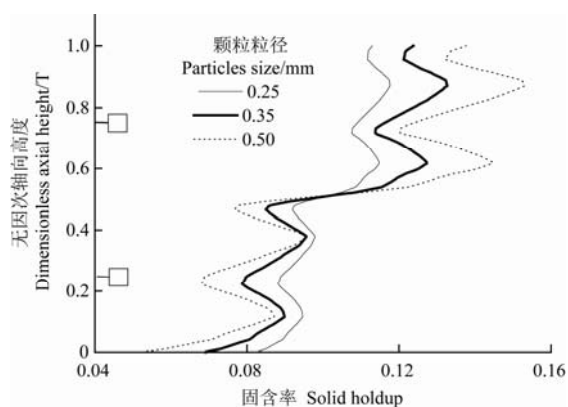
图 11 和图 12 反映了轻密度颗粒粒径对其固含



注: 搅拌转速为 $N=250$ r/min; 平均固含率为 $\bar{\alpha}_s=0.1$ 。
Note: Stirring speed is $N=250$ r/min; average solid holdup is $\bar{\alpha}_s=0.1$.

图 11 不同颗粒尺寸下垂直截面固含率分布

Fig.11 Solid holdup distribution in vertical plane for different particles size



注: 径向位置为 $r/R=0.78$; 搅拌转速为 $N=250$ r/min; 平均固含率为 $\bar{\alpha}_s=0.1$ 。

Note: Radial position is $r/R=0.78$; stirring speed is $N=350$ r/min; average solid holdup is $\bar{\alpha}_s=0.1$.

图 12 不同颗粒尺寸下固含率轴向分布

Fig.12 Axial solid holdup distribution for different particles size

率分布的影响。可以看出颗粒粒径对固含率分布的均匀性影响较大, 当颗粒粒径很小时, 搅拌槽内固含率分布比较均匀, 颗粒浓度在轴向高度上的分区现象较弱, 随着颗粒尺寸增大, 固含率分布的均匀性变差。由图 12 还可以看出, 在循环涡处局部固含率随颗粒粒径变化更明显些。

4 结论

本文对轻密度颗粒在一双层桨搅拌槽内的悬浮特性进行了数值模拟研究, 得出如下结论:

1) 模拟得到了搅拌槽内宏观流动场和固含率分布规律, 模拟结果和文献试验值吻合, 说明采用本文的方法可以对轻密度颗粒在搅拌槽的悬浮特性进行计算并可视化。

2) 轻密度颗粒固含率分布总体上沿轴向高度增大, 并有一定的分区现象。在液面中心处颗粒浓度最高, 而在槽底中心处则最低; 在循环涡涡心和桨叶片后部, 颗粒浓度相对较高; 在轴向上的固含率分区现象则受流型影响较大。

3) 模拟考察了搅拌转速、颗粒含量和颗粒粒径对搅拌槽内颗粒悬浮特性的影响。搅拌转速增加或颗粒尺寸减小, 固体颗粒悬浮的均匀性增加, 但固体颗粒含量对颗粒悬浮均匀性影响不是很明显。

[参 考 文 献]

[1] Rajendra N Sharma, Abdullah A. Solids suspension in stirred tanks with pitched blade turbines[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(10): 2123—2140.
[2] Angst R, Kraume M. Experimental investigations of stirred solid/liquid systems in three different scales:

Particle distribution and power consumption[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(9): 2864—2870.

[3] Kasat G R, Khopkar, Ranade V V, et al. CFD simulation of liquid-phase mixing in solid liquid stirred reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(15): 3877—3885.

[4] Virdung T, Rasmuson A. Solid-liquid flow at dilute concentrations in an axially stirred vessel investigated using Particle Image Velocimetry[J]. Chemical Engineering Communications, 2008, 195(1):18—34.

[5] Unadkat H, Rielly C D, Hargrave G K. Application of fluorescent PIV and digital image analysis to measure turbulence properties of solid-liquid stirred suspensions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(4):573—582.

[6] 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 等. 基于 Mixture 多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 7—12.

Zhao Binjuan, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on mixture model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 7—12. (in Chinese with English abstract)

[7] Montante G, Occulti M H, Magelli F, et al. PIV measurements of mean flow and turbulence modulation in dilute solid liquid stirred tanks[C]// 15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid mechanics Lisbon Portugal, 2010.

[8] 杨敏官, 来永斌. 搅拌槽内固液悬浮特性的试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 186—192.

Yang Minguan, Lai Yongbin. Experiment investigation on solid-liquid suspension characteristics in stirred vessel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6): 186—192. (in Chinese with English abstract)

[9] 包雨云, 龙建刚, 高正明, 等. 上浮颗粒特性对三相搅拌槽内固-液悬浮及气-液分散的影响[J]. 高校化学工程学报, 2006, 20(1): 25—30.

Bao Yuyun, Long Jiangang, Gao Zhengming, et al. Effects of buoyant particle characteristics on solid-liquid suspension and gas-liquid dispersion in a three phase stirred tank[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2006, 20(1): 25—30. (in Chinese with English abstract)

[10] 陈涛, 吴大转, 杜红霞, 等. 低密度固体颗粒与液体搅拌混合过程的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2): 271—274.

Chen Tao, Wu Dazhuan, Du Hongxia, et al. Numerical simulation on low-density solid-liquid mixing process[J].

- Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2): 271—274. (in Chinese with English abstract)
- [11] Kuzmanic N, Zanetic R, Akrap M. Impact of floating suspended solids on the homogenization of the liquid phase in dual-impeller agitated vessel[J]. Chemical Engineering Processing, 2008, 47(4): 663—669.
- [12] Karcz J, Mackiewicz B. An effect of particle wettability on the draw down of floating solids in a baffled agitated vessel equipped with a high speed impeller[J]. Chemical and Process Engineering, 2007, 28(3): 661—672.
- [13] 徐世艾. 气液固三相搅拌设备研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
Xu Shiai. Study on Gas-liquid-solid Three phase Mixing Equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [14] Ochieng A, Lewis A E, Nickel solids concentration distribution in a stirred tank[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(2): 180—189.
- [15] 刘永兵, 陈纪忠, 杨永荣. 管道内液固浆液输送的数值模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(5): 858—863.
Liu Yongbing, Chen Jizhong, Yang Yongrong. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow in slurry pipeline transportation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(5): 858—863. (in Chinese with English abstract)
- [16] Murthy B N, Ghadge R S, Joshi J B. CFD simulations of gas-liquid-solid stirred reactor: Prediction of critical impeller speed for solid suspension[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(24): 7184—7195.
- [17] Tamburini A, Cipollina A, Micale G, et al. Dense solid-liquid off-bottom suspension dynamics: simulation and experiment[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(4): 587—597.
- [18] Ochieng A, Onyango M S. CFD simulation of solids suspension in stirred tanks: Review[J]. Hem Ind, 2010, 64(5): 365—374.
- [19] 杨锋苓, 周慎杰, 张翠勋, 等. 无挡板搅拌槽的固液悬浮特性[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(4): 185—189.
Yang Fengling Zhou Shenjie, Zhang Cuixun, et al. Solid-liquid suspension in an unbaffled stirred tank[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(4): 185—189. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化工学报, 2001, 52(1): 1—12.
Zhang Zheng, Xie Zhuoli. Numerical simulation of fluid-solid two-phase flows[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(1): 1—12. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王维, 李佑楚. 颗粒流体两相流模型研究进展[J]. 化学进展, 2000, 12(2): 208—217.
Wang Wei, Li Youchu. Progress of the simulation of particle-fluid two-phase flow[J]. Progress in Chemistry, 2000, 12(2): 208—217. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张淑君, 王惠民, 吴锤结. 悬浮颗粒运动的数值模拟方法进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 612—615.
Zhang Shujun, Wang Huimin, Wu Chuijie. Advances in numerical simulation of motion of suspended particles[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(6): 612—615. (in Chinese with English abstract)
- [23] Wen C Y, Yu Y H, Mechanics of fluidization[J]. Chem. Eng. Prog. Symp. Series, 1966, 62(2): 100—111.
- [24] 齐亚茹, 董俊华, 高炳军. 含固体颗粒流体用安全阀的自动冲洗装置及冲洗过程数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 158—164.
Qi Yaru, Dong Junhua, Gao Bingjun. Automatically flushing device of relief valve for fluid with solid particles and numerical simulation of flushing process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 158—164. (in Chinese with English abstract)
- [25] 毛德明. 多层浆搅拌釜内流动与混合的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
Mao Deming. Basic Study on Flow and Mixing in Multiple Impeller Stirred Vessel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998. (in Chinese with English abstract)
- [26] Rutherford K, Lee K C, Mahmoudi S M S, et al. Hydrodynamic characteristics of dual Rushton impeller stirred vessels[J]. AIChE J, 1996, 42(2): 332—346.
- [27] Micale G, Brucato A, Grisafi F. Prediction of flow fields in a dual-impeller stirred vessel[J]. AIChE J, 1999, 45(3): 445—464.
- [28] 钟丽. 搅拌槽内固-液悬浮的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2003.
Zhong Li. Numerical Simulation of Solid-liquid Suspension in Stirred Vessel[D]. Beijing: Beijing University of Chemical and Technology, 2003. (in Chinese with English abstract)

Numerical simulation of solid-liquid suspension characteristics for low-density particles in stirred vessel

Li Liangchao, Yang Jun, Xu Bin

(Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process of Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Low-density particles solid-liquid suspension characteristics are very critical problem in stirred vessels industrial process. Solid-liquid suspension characteristics for low-density particles in a dual six-blade-Rushton-turbine(6-DT) impeller stirred vessel was simulated numerically by using computational fluid dynamics (CFD). The multiple reference frame (MRF) and Euler-Euler two fluid model based on the kinetics of granular were used in the simulation. Flow field and solid holdup distribution in the stirred vessel were obtained and realized visualization. Furthermore, the influences of the operating condition on solid-liquid suspension were investigated. The simulated results are in good agreement with experimental data in the literature, which verified the feasibility of our numerical method. The research results show that the flow pattern in a dual-radial-impeller stirred vessel was closely related to the clearance of the two impellers. When the clearance is greater or equal to a half diameter of the vessel, parallel flow will form, since the effect among the circulation flows is less. A typical double circulation pattern is formed for every disc turbine, and there are four circulation loops in the stirred vessel. Liquid velocity decreases slightly with low-density particles adding to the vessel. On the whole, solid holdup increases along the axial height. The highest solid concentration is found in the center of the liquid surface region for low-density particles which easily accumulate there, while the lowest solid holdup is in the center of the bottom region. Solid holdup in the center of the circulation loops and behind the blades is relatively high. The phenomenon of solid holdup regional distribution is also observed in the dual-radial-impeller stirred vessel. Taking the height of $h=0.5T$ as a boundary, the vessel can be subdivided into upper region and lower region, and solid holdup in upper region is obviously higher than that in lower region. With the increasing of impeller speed, solid holdup in the liquid surface region and upper region decreases significantly, while it increases in lower region of the stirred vessel. Solid suspension is even for very small size particles. The uniformity of solid suspension worsened with the increasing of particles size or the reducing of impeller speed. The effect of particles content on solid suspension is not very obvious. The study can provide helpful references for design, optimization, and scale-up of the stirred vessel for low-density particles suspension.

Key words: numerical analysis, liquids, solids, suspensions, stirred vessel, low-density particles, two-phase flow

(责任编辑: 张俊芳)