

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.20191315

不同推进式桨叶对搅拌反应器内气液两相混合特性的影响

黎义斌^{1,2}, 宋亚娟¹, 歹晓晖¹, 李正贵³

(¹兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; ²甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050; ³西华大学流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039)

摘要: 为了研究不同推进式桨叶对搅拌反应器内气液两相混合特性的影响, 以某搅拌反应器的推进式桨叶为研究对象, 将搅拌聚合物简化为含5%气体的清水介质, 基于螺旋桨叶片设计方法和CFD流场仿真技术, 采用VOF多相流模型和RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对四种推进式桨叶内部气液两相流动进行数值分析, 实现了推进式桨叶参数设计和性能优化。分析设计转速在400 r/min时的径向速度、0~18 s的时间范围内气体体积分数的变化、无量纲气体体积分数以及无量纲轴向速度, 来评价四种推进式搅拌反应器搅拌性能的剪切、混合、分散。研究结果表明: 变螺旋角(FDC-450- γ)非对称桨叶的流动更均匀、混合速率更快和剪切分散能力强。通过对四种不同推进式桨叶的比较分析, 为后续的研究和工程实践奠定了基础。

关键词: 推进式桨叶; 两相流; 混合特性; 计算流体力学; 搅拌器

中图分类号: TQ 027

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2020) S1-0227-09

Effects of different propeller blades on gas-liquid two-phase mixing characteristics in stirred reactor

LI Yibin^{1,2}, SONG Yajuan¹, DAI Xiaohui¹, LI Zhenggui³

(¹School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; ²Gansu Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Lanzhou 730050, Gansu, China; ³Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: A stirred reactor is a device that supplies mechanical energy to a stirred medium by obtaining a suitable flow field. It is widely used in industrial production, especially in the chemical industry, and many chemical production applications are more or less affected by the effect of stirring. Due to the lack of data on the design parameters of propeller blades at home and abroad, the profile of propeller blades is poor, and the stirring performance needs to be improved. In order to study and compare the stirring effect of several propeller blades, the propelling blade of the stirred reactor is taken as the research object, and polymerization medium of the mixing reactor is simplified to water and gas. First, the propeller blades are designed according to the design parameters. Four different types of propeller blades are designed by using different helix angles and contour shapes. Then, three-dimensional diagrams of the four propelled stirred reactors are drawn and unstructured meshing is performed according to the two-dimensional diagrams. Finally, the internal flow characteristics of the four propelled stirred

收稿日期: 2019-11-04 修回日期: 2020-01-07

通信作者及第一作者: 黎义斌(1977—), 男, 博士, 副教授, liyibin58@163.com

基金项目: 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室开放基金项目(szjj2019-011)

引用本文: 黎义斌, 宋亚娟, 歹晓晖, 李正贵. 不同推进式桨叶对搅拌反应器内气液两相混合特性的影响[J]. 化工学报, 2020, 71(S1): 227-235

Citation: LI Yibin, SONG Yajuan, DAI Xiaohui, LI Zhenggui. Effects of different propeller blades on gas-liquid two-phase mixing characteristics in stirred reactor[J]. CIESC Journal, 2020, 71(S1): 227-235

reactors were simulated and analyzed by using multiple reference frames, VOF multiphase flow models, and RNG $k-\varepsilon$ turbulence models. When the speed is 400 r/min, we qualitative analyze the distribution and uniformity of radial velocity and the mixing degree through comparing radial velocity cloud graph and the variation of gas volume fraction cloud graph from 0 to 18 s (including 0.6 s, 6 s, 12 s and 18 s). Besides we also define the dimensionless gas volume fraction and axial velocity, so 0 to 18 s (including 0.6 s, 6 s, 12 s and 18 s) hybrid rate, distribution of the gas volume fraction and the rate of change of the axial velocity are quantitative analyzed. According to the results of numerical simulation, the mixing characteristics and mixing degrees of the four types of propelled stirred reactors were compared. We can draw the following conclusions the asymmetric blades with variable spiral angle (FDC-450- γ) has a more uniform flow rate, the mixing rate is faster and the mixing degree is better. In this paper, four different propeller blades are selected for comparison and analysis, which lays the foundation for subsequent research and engineering practice.

Key words: propeller blade; two-phase flow; mixing characteristics; computational fluid dynamics; stirred vessel

引 言

搅拌反应器广泛应用于化工、制药、石油炼制等行业的搅拌和化学反应^[1-3]。在搅拌过程中,选取合适的桨叶对搅拌反应器的混合效果有重要的影响。目前,国内外诸多学者对搅拌反应器内部多相流动规律进行了深入的研究。Dular等^[4-8]采用多相流VOF方法对搅拌槽内流场进行了数值模拟分析和研究;李挺等^[9-10]通过对不同类型桨叶进行比较,得出了不同桨叶搅拌槽内的宏观混合特性并研究了影响微观混合的参数;Kawahara等^[11-13]采用实验的方法对搅拌器内部混合过程进行了研究;Sun等^[14-19]通过数值模拟与实验相结合的方法对桨叶的搅拌性能进行了研究和对比;Wang等^[20]采用改进的内-外迭代方法对Rushton圆盘涡轮包括叶轮区域的气液流场进行了数值模拟,结果表明此方法普遍适用于气液搅拌槽的模拟,可以获得搅拌槽的气腔和避免挡板两侧气体积聚等特性;Roman等^[21-23]利用改进的Rushton涡轮混合容器,分别研究了颗粒对气液传质过程的影响、搅拌器在三相系统中的功率消耗以及颗粒对气液流体动力学的影响;Liu等^[24]研究了一种满足高变黏度系统需要的同轴混合器,对这种同轴混合器在层流和过渡流中的功率消耗和流场特性进行了数值模拟;Bao等^[25]采用离散元方法研究了叶轮结构和工作条件对圆柱形混合器中颗粒流动和混合的影响;Reviol等^[26]对推进式搅拌器搅拌非牛顿流体开发了一种全新的设计程序设计方法,并指出这种方法的不足;钟天铨等^[27]通过建立流体力学模型对推进式搅拌器的固

液两相性流能进行了相关研究;刘培坤等^[28]用数值模拟方法对涡轮式与推进式搅拌釜进行分析得到如下结果:当转速为100 r/min时推进式搅拌釜内流体的平均速度高,流体的排出性更强,混合效率更高。

综上所述,国内外对推进式桨叶设计参数和性能研究的数据较少,使得到的外形轮廓欠佳,性能也有待提高。因此对推进式桨叶的进一步研究是很有必要的。本文以两种对称推进式桨叶(分别为恒螺旋对称桨叶和变螺旋对称桨叶)和两种非对称推进式桨叶(分别为恒螺旋非对称桨叶和变螺旋非对称桨叶)为研究对象,研究了四种不同搅拌反应器内气液两相搅拌过程的变化以及气液两相的混合效果。

1 推进式桨叶的设计

1.1 推进式桨叶的设计

推进式桨叶的设计过程主要参考螺旋桨设计方法,并且对其中的一些参数进行了修正。依次设计两种形状的推进式桨叶,分别为对称桨形和非对称形。推进式桨叶的设计过程主要分为三部分:桨叶展开图的外轮廓形状;桨叶的横截面形状;每个横截面的螺旋角 γ 。

1.1.1 设计参数 取桨叶的叶片数为3;桨叶采用方螺距结构,即螺距取 $H=D_j$;由于轴套外径在 $D_n=(0.16\sim 0.2)D_j$ 范围内不影响流体力学特性,所以在这里取 $D_n=0.2D_j$;由于 $c/D_j=0.4\sim 1.1$ 之间变化时,对功率准数基本上无影响,所以文中取 $c/D_j=350/450=0.78$,符合 c/D_j 的变化,而且对其他参数基本无影响;搅拌器的设计转速为400 r/min。

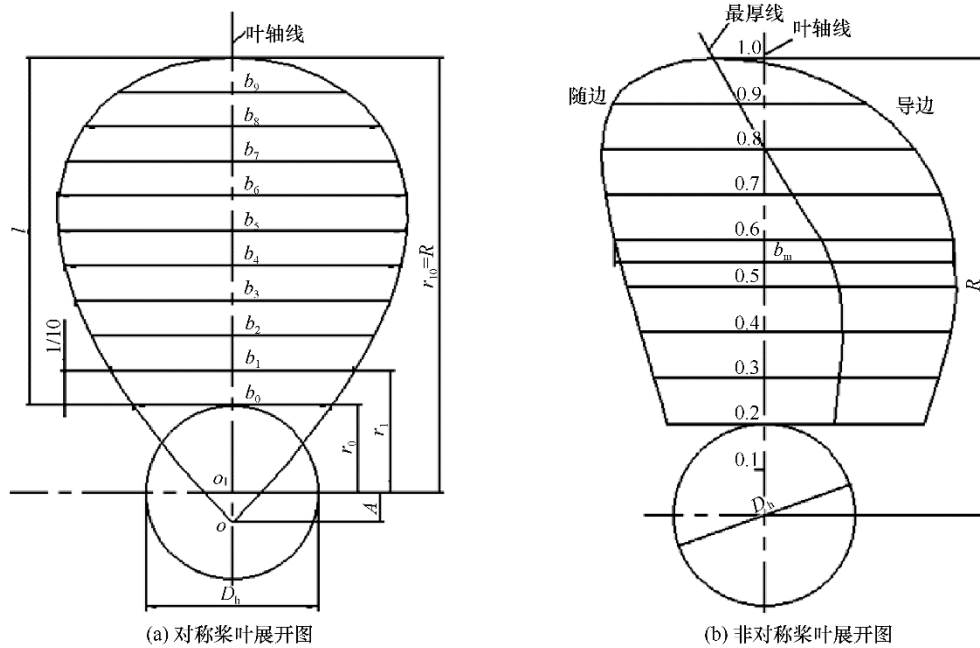


图1 推进式桨叶展开图

Fig.1 Expansion drawing of propelling blade

1.1.2 桨叶外轮廓形状和横截面形状的确 首先,对桨叶的展开图形进行绘制。对称桨叶的展开图如图1(a)所示,设计过程如下:根据搅拌反应器的设计参数,选取桨叶的直径,根据桨叶直径确定其他相关参数。通过已经确定的桨叶直径、轮毂直径、横截面长度 b_i 以及 A 来绘制桨叶的外轮廓形状。其中,横截面长度 b_i 按式(1)来确定

$$b_i = k_i [D_j^2 / (D_j - D_h)] \quad (1)$$

对式(1)中的系数 k_i 用Matlab进行了拟合,拟合后的 k_i 曲线如图2所示; A 用文献[29]中的公式来确定,如式(2)所示

$$A = 0.335R - 0.666D_h \quad (2)$$

非对称桨叶的展开图如图1(b)所示,与对称桨叶设计过程不同的是:非对称桨叶的横截面长度 b_i 的求解方法与对称桨叶是不同的。在非对称桨叶中主要是根据最大宽度 b_m 来确定桨叶横截面宽度, b_m 的位置在 $r=0.6R$ 处,且 $b_m=0.37D_j$ 。其余横截面宽度 b_i 值的求解如表1所示。将桨叶所求的参数用光滑的曲线相连就得到了如图1(b)所示的桨叶展开平面图。

其次,对桨叶横截面的形状进行绘制,横截面是由压出面和吸入面组成的。其中,桨叶的压出面是由螺旋面的一部分形成的,吸入面为二次抛物线或者圆弧线,也可以看成翼形。

取桨叶的厚度为 $\delta=27$ mm,对称桨叶横截面的

表1 非对称形桨叶的横截面宽度 b_i 的确定

Table 1 Cross-sectional width b_i of asymmetric blades

r/R	$(x_2/b_m)/\%$	$(x_1/b_m)/\%$	$(b/b_m)/\%$	$(b_i/b)/\%$
0.2	28.68	46.99	75.67	35
0.3	32.67	51.24	83.91	35
0.4	36.62	54.91	91.53	35
0.5	40.53	56.52	97.05	35.5
0.6	44.18	55.82	100	38.9
0.7	46.97	52.22	99.19	44.2
0.8	48.22	44.63	92.85	47.8
0.9	45.46	30.31	75.77	50

注: x_2 —从叶轴到随边的距离; x_1 —从叶轴到导边的距离; b —桨叶截面全宽; b_i —最厚线到导边距离。

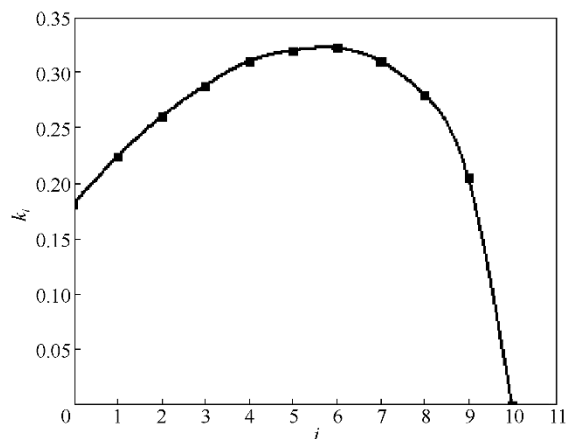


图2 系数 k_i 的曲线

Fig.2 Curve of coefficient k_i

形状如图 3(a)所示, y 值为等分值, x 值的计算如式 (3)所示

$$x = (y/0.5b_i)^2 \delta_i \quad (3)$$

非对称桨叶如图 3(b)所示,其吸入面和压出面的确定由文献[29]可得。将横截面的确定的点用光滑的曲线相连即可得桨叶横截面图。

1.1.3 确定螺旋角 γ 计算每一个横截面的螺旋角 γ , 设定两种不同的角度变化, 第一种为: 每一个横截面上的螺旋角都是变化的, 每一个横截面的螺旋角 γ 按式(4)进行计算

$$\gamma = \arctan\left(\frac{H}{2\pi r}\right) \quad (4)$$

其中, r 为每一个横截面的旋转半径。第二种为: 取每一个横截面上的螺旋角为定值, 取 32° 。根据第一种方法求得每个横截面上的螺旋角并取平均值为 32° , 所以取为第二种的螺旋角度数。

表 2 四种推进式桨叶的名称简化

Table 2 Simplified names of four propelling blades

名称	表示方法	含义
恒螺旋对称桨叶	DC-450-32	DC-450- γ 桨叶各个横截面的角度变化 桨叶直径 结构为对称DC和非对称FDC 桨叶
变螺旋对称桨叶	DC-450- γ	
恒螺旋非对称桨叶	FDC-450-32	
变螺旋非对称桨叶	FDC-450- γ	

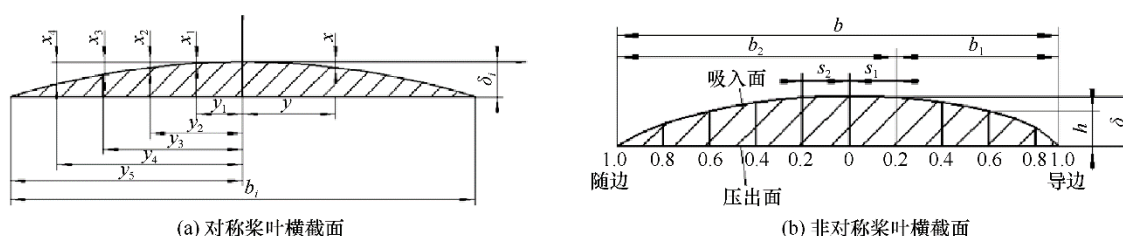


图 3 桨叶横截面图

Fig.3 Cross-section of blade

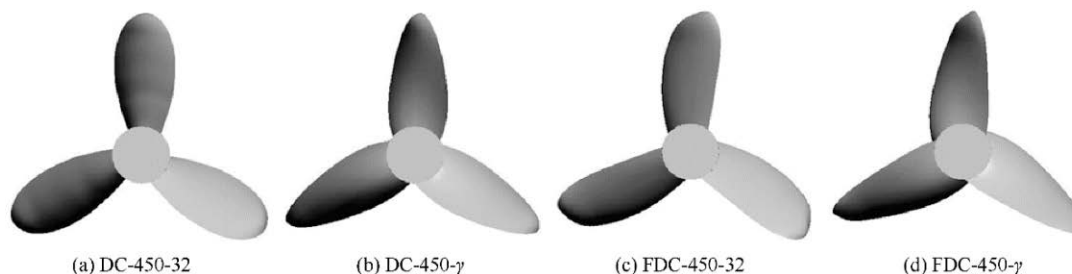


图 4 四种推进式桨叶的三维模型

Fig.4 Three-dimensional models of four propelling blades

1.2 推进式桨叶三维模型

设计四种不同的推进式桨叶如表 2 所示, 并且分别对四种推进式桨叶进行了命名和简单符号进行表示, 表示方法如表 2 所示。利用 Pro/E 三维建模软件分别对四种推进式桨叶进行建模, 并绘制四种桨叶的水体模型。四种推进式桨叶的三维模型如图 4 所示。

2 数值模拟

2.1 搅拌反应器几何模型

模拟的搅拌反应器的罐体直径 D 为 1300 mm, 高度 H 为 2100 mm, 搅拌反应器的罐体的厚度为 32 mm, 底面深度 c 为 350 mm。搅拌反应器的示意图以及水力模型如图 5 所示。

2.2 网格划分

采用 Gambit 软件对搅拌反应器计算域进行非结构化网格划分, 以 DC-450-32 推进式桨叶为例, 首先将计算域划分为旋转域和静止域, 如图 6 所示。然后对旋转域采用网格尺寸分别为 8、9、10、11、12, 静止域最大网格尺寸采用 40, 网格比率为 1.6 进行网格划分。最后通过对几种网格进行无关性验证, 从功率的稳定性和计算时间两方面考虑, 选取旋转域网格尺寸为 10、网格数为 1217306 个的模型。为了对比模拟结果的准确性, 对其余几种桨叶的旋转域和静止域也采用相同的尺寸。

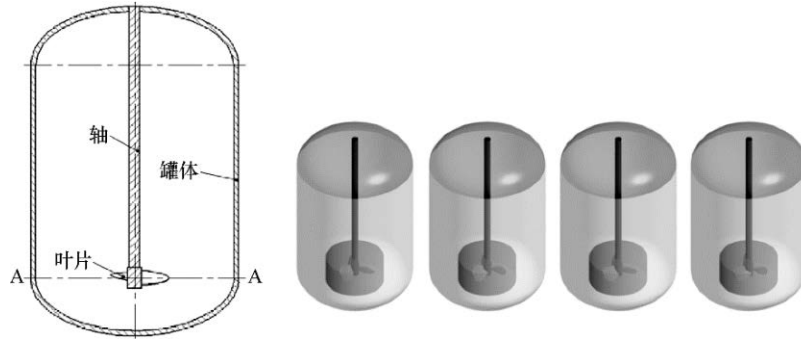


图5 四种不同搅拌反应器

Fig.5 Four different stirring reactors

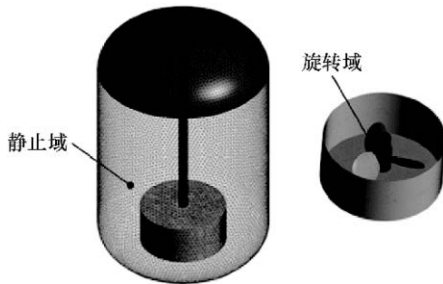


图6 搅拌反应器网格划分

Fig.6 Mesh generation of stirring reactor

2.3 计算模型

将反应介质简化为液相和气相,上部分为气相,下部分为液相。由于为两相为交界多相流模型,采用VOF多相流模型,VOF由自由面位置和流体体积的体概率函数表示,可以应用于有分界面的多相流混合^[30]。该模型要求被模拟流体不能互溶,且所有流体具有一个动量方程。在整个计算域内,分别跟踪各计算单元的体积分数,并且每增加一种流体,引入相应的体积分数。就每个控制体积而言,所有相体积分数之和为常数1。采用多重参考系求解,选取RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,近壁面采用标准壁面函数压力,速度耦合选用SIMPLE进行求解,为了保证收敛性,体积分数选用一阶迎风离散格式,其余通量计算全部采用二阶迎风离散格式。由于RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型来源于严格的模型统计技术,有效改善了精度并且考虑到了湍流漩涡,在搅拌设备中一般都为低 Reynolds 数流动。由于RNG理论提供了一个考虑低 Reynolds 数流动黏性的解析公式,提高了在这方面的精度,所以采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。

边界条件的设定:将搅拌反应器设置为旋转壁面和静止壁面,其中轴和桨叶为旋转壁面,转速为400 r/min,其余为静止壁面,在旋转域和静止域交界

面处设置为interface进行数据传递。

3 模拟结果分析

3.1 轴功率和轴向力

轴功率 P 是衡量搅拌反应器桨叶搅拌性能的一重要指标,通过数值模拟结果,对几种搅拌反应器的轴功率和轴向力进行了分析和比较。从图7柱状图中可以看出DC-450- γ (变螺旋角对称)桨叶的轴向力和轴功率最大,FDC-450-32(恒螺旋角非对称)桨叶的轴向力和轴功率最小。变螺旋的轴向力要比恒螺旋的轴向力大,主要是由于变螺旋的螺旋角 γ 沿着叶长变化,液体质点被推向各个方向,产生了有利于强化搅拌的作用。

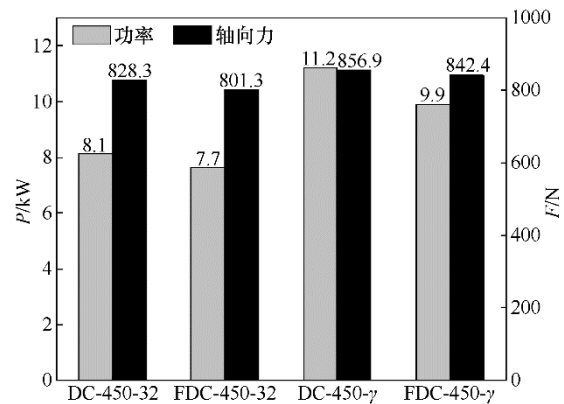


图7 搅拌反应器的轴向力以及轴功率

Fig.7 Axial force and axial power of stirring reactor

3.2 速度云图

图8所示为四种推进式桨叶的搅拌反应器在横截面A—A上的速度分布云图,反映了各个桨叶沿径向搅拌的程度。从几种桨叶横截面速度云图可以看出,液体均在垂直于轴的平面上绕轴做旋转运动进行混合,旋转方向为顺时针。从速度的分布和均匀性来进行分析,FDC-450- γ 桨叶的速度分布、

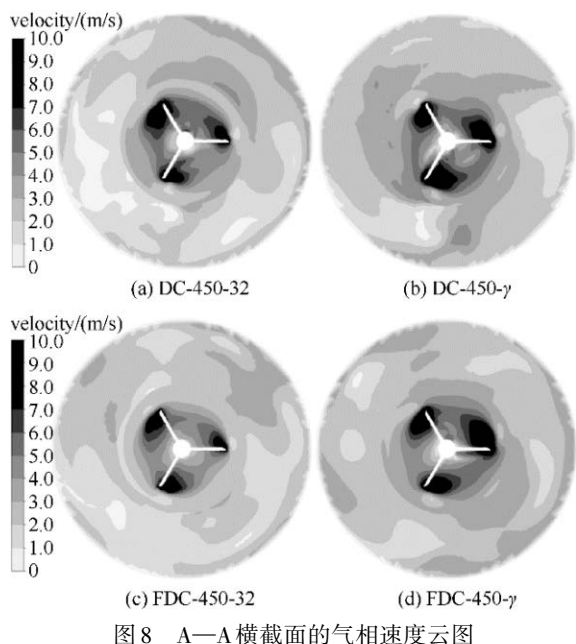


图 8 A—A 横截面的气相速度云图

流动性和均匀性要好于其他几种桨叶。

3.3 气体体积分数

图 9 为 0.6、6、12 以及 18 s 时四个监测时间点的 气体体积分数变化云图,颜色越深代表气体的含量 越高,从几种气体体积分数变化中可以看出气体在 0~18 s 的气体体积分数的变化过程。在变化过程 中选取 12 s 和 18 s 两个时间节点进行比较和分析。 由图可以清楚地看出,12 s 时,DC-450-32 桨叶底 部的气体含量相对其他三种桨叶较低,DC-450- γ 桨叶和 FDC-450-32 桨叶在轴两侧气体含量较 FDC-450- γ 桨叶低;18 s 时,DC-450-32 桨叶有 大部分底部气体体积分数含量低于其他三种桨叶, FDC-450-32 桨叶在搅拌釜体壁面附近有少部分 气体,体积分数小。也就是说在 12 s 和 18 s 时气体 含量低的搅拌反应器中桨叶的搅拌作用和轴的吸 气能力较差。

3.4 气体体积分数的无量纲化

对搅拌罐底部的九个监测点在 6 s、12 s 以及 18 s 时的气体体积分数在 CFD-POST 中进行了监测和 记录,监测点的选取如图 10(a)所示。为了研究九个 监测点在 0~18 s 时间段内的气液两相流的混合程 度,定义常数 C 用来衡量搅拌的效果, C 值越大表明 搅拌混合的速率越快,反之则搅拌速率越慢。

$$C = \frac{\Phi_{\min}}{\Phi_{\text{ave}}} \quad (5)$$

式中, Φ_{\min} 为在 XZ 平面上取的一系列点的最小

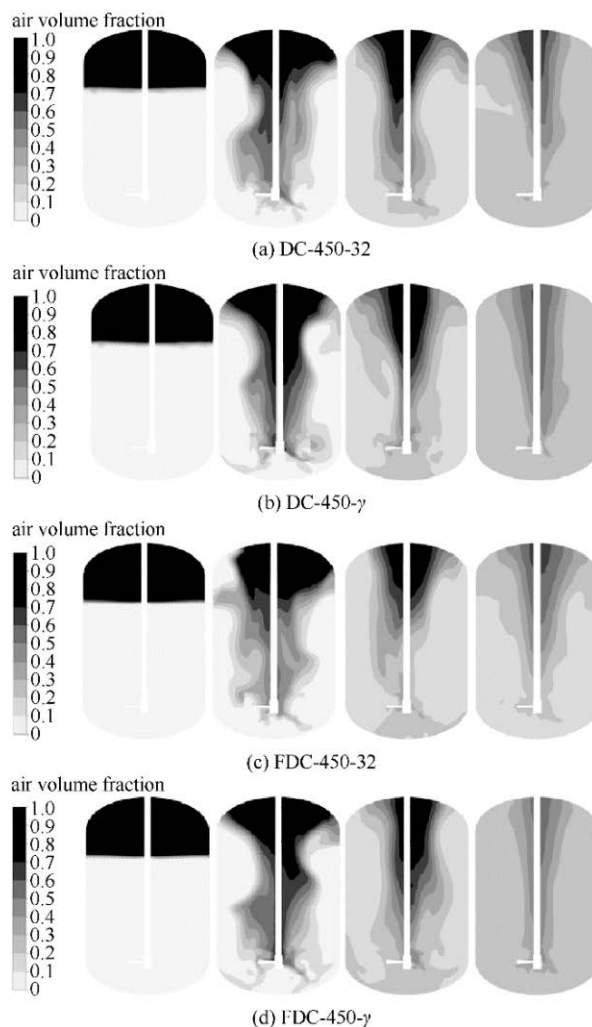


图 9 搅拌反应器在 0~18s 内的气体体积变化过程

气体体积分数值; Φ_{ave} 为在 XZ 平面上气体体积分数的 平均值。

对几种推进桨叶在 0~18 s 时间气体体积分数的 变化情况作出如图 10(b)所示的柱状图。从图中可 以看出随时间的变化气体体积分数的变化分布情 况,在 6 s 和 12 s 时 DC-450- γ 桨叶和 FDC-450- γ 桨 叶的 C 值大于其他两种桨叶且相差不大;在 18 s 时 FDC-450- γ 桨叶的 C 值明显大于其他几种桨叶。 由于 C 值越大表明搅拌速率越快,在柱状图中可以 看出在相同的时间段内 FDC-450- γ 桨叶的混合速 率更快、分散能力更强,能够使聚合物更快达到所 需要的混合状态。

3.5 无量纲轴向速度

选取沿轴向方向的五个点,测取轴向速度并且 选取最大轴向速度。定义一个轴向的无量纲速度, 用来表征和衡量轴向的搅拌程度。

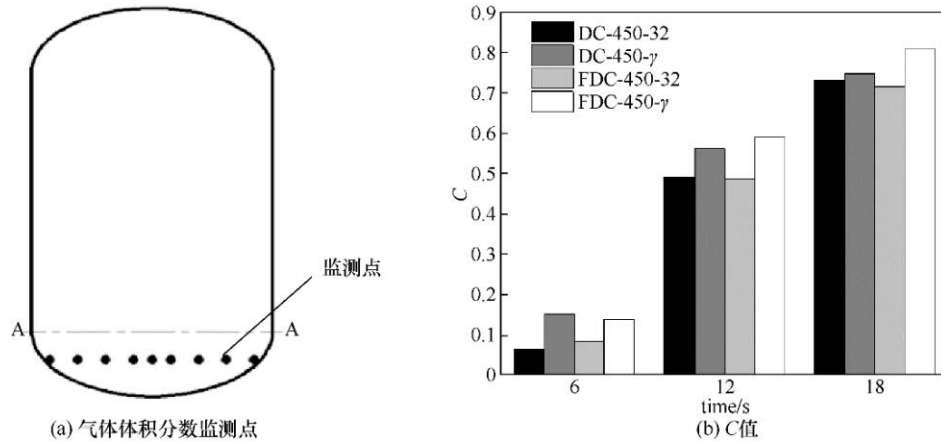


图10 气体体积分数无量纲化分析

Fig.10 Dimensionless analysis of gas volume fraction

$$[v] = \frac{v_z}{v_{\max}} \quad (6)$$

式中, v_z 为沿轴向某一位置的轴向速度; v_{\max} 为沿轴向位置的最大轴向速度。

对轴向无量纲速度作出如图11所示曲线,从几种曲线可以看出 FDC-450- γ 桨叶的无量纲速度高于其他几种桨叶。推进式桨叶属于一种轴向搅拌的桨叶,轴向桨叶的轴向无量纲速度越大则表明轴向搅拌越强、剪切能力越大。也就是说,在几种推进式桨叶中 FDC-450- γ 桨叶的轴向搅拌的混合是较优的。

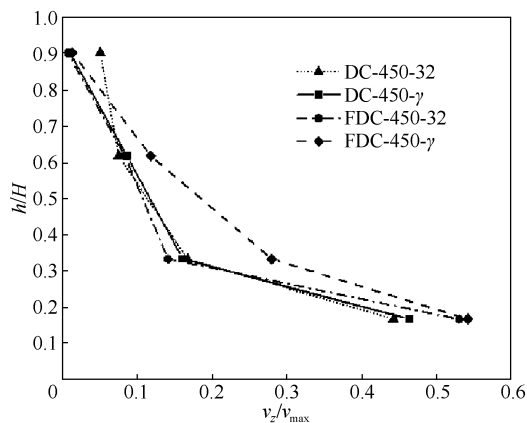


图11 无量纲速度沿轴向的变化

Fig.11 Dimensionless velocity changes in axial direction

4 结论

通过对4种推进式桨叶进行分析和比较,得出以下结论。

(1) 由于变螺旋的螺旋角 γ 沿着叶长变化,能够产生利于强化搅拌的作用力,所以变螺旋桨叶(包

括对称和非对称)的轴向力更大,轴向流动性更强;由于非对称桨叶(包括恒螺旋和变螺旋)能够使反应介质进行更大面积的相互接触,所以非对称桨叶的轴功率更小。

(2) 通过分析 A—A 横截面的速度分布和无量纲轴向速度的曲线,结果表明:变螺旋角桨叶的径向速度分布更均匀,轴向流动更强,且在罐体附近没有明显的盲区,桨叶的对称性对介质的流动影响不大。

(3) 通过分析 0~18 s 内的气体体积分数和无量纲化的气体体积分数,结果表明:在搅拌初期(0~6 s)几种桨叶的混合速率相差不大,之后(6~12 s)变螺旋角桨叶能够带动罐底的气液混合,减少底部的混合死区;同样,非对称桨叶也能够改善底部的混合情况,即 FDC-450- γ 桨叶的搅拌均匀度更好,混合速率更快。

符号说明

- A —— 点 O 与 O_1 之间的距离, mm
- b_i —— 桨叶横截面长度, mm
- b_m —— 非对称桨叶最大宽度, mm
- C —— 用来衡量搅拌效果的无量纲常数
- c —— 桨叶离搅拌槽底距离, mm
- D —— 搅拌反应器直径, mm
- D_h —— 轴套外径, $D_h = (0.16 \sim 0.2) D_j$, mm
- D_j —— 桨叶直径, mm
- H —— 螺距, mm
- k_i —— 计算横截面长度的系数
- P —— 轴功率, kW
- R —— 桨叶半径, mm
- r —— 非对称桨叶最大宽度处的半径, mm

- v_{\max} ——沿轴向位置的最大轴向速度, m/s
 v_z ——沿轴向某一位置的轴向速度, m/s
 $[v]$ ——衡量轴向搅拌的无量纲参数
 γ ——桨叶横截面的螺旋角
 δ ——桨叶横截面的厚度, mm
 δ_i ——每个桨叶横截面的厚度, mm
 Φ_{ave} ——在 XZ 平面上气体体积分数的平均值
 Φ_{min} ——在 XZ 平面上取的一系列点的最小气体体积分数值

参考文献

- [1] 刘宝庆, 郑毅骏, 梁慧力, 等. 剪切变稀体系同心双轴搅拌釜内的气液分散模拟[J]. 化工学报, 2017, **68**(6): 2280–2289.
Liu B Q, Zheng Y J, Liang H L, et al. CFD simulation on shear-thinning gas-liquid dispersion in coaxial mixer[J]. CIESC Journal, 2017, **68**(6): 2280–2289.
- [2] 王峰, 冯鑫, 毛在砂, 等. 搅拌槽内多相流动数值模拟研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2009, **31**(4): 103–110.
Wang F, Feng X, Mao Z S, et al. Numerical simulation progress on multiphase flow in stirred tanks[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2009, **31**(4): 103–110.
- [3] Liu B Q, Zhang Y K, Chen M Q, et al. Power consumption and flow field characteristics of a coaxial mixer with a double inner impeller[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, **23**(1): 1–6.
- [4] Dular M, Bajcar T, Slemenik-Pere L, et al. Numerical simulation and experimental study of non-Newtonian mixing flow with a free surface[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2006, **23**(4): 473–486.
- [5] Haque J N, Mahmud T, Roberts K J. Modeling turbulent flows with free-surface in unbaffled agitated vessels[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2006, **45**(8): 2881–2891.
- [6] Mahmud T, Haque J N, Roberts K J, et al. Measurements and modelling of free-surface turbulent flows induced by a magnetic stirrer in an unbaffled stirred tank reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2009, **64**(20): 4197–4209.
- [7] Glover G M C, Fitzpatrick J J. Modelling vortex formation in an unbaffled stirred tank reactors[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, **127**(1): 11–22.
- [8] Torré J P, Fletcher D F, Lasuyec T, et al. An experimental and computational study of the vortex shape in a partially baffled agitated vessel[J]. Chemical Engineering Science, 2007, **62**(7): 1915–1926.
- [9] 李挺, 贾卓泰, 张庆华, 等. 几种单层桨搅拌槽内宏观混合特性的比较[J]. 化工学报, 2019, **70**(1): 32–38.
Li T, Jia Z T, Zhang Q H, et al. Comparison of macro-mixing characteristics of a stirred tank with different impellers[J]. CIESC Journal, 2019, **70**(1): 32–38.
- [10] 杨娟, 张庆华, 杨超, 等. 不同组合桨搅拌槽内非牛顿流体的微观混合特性[J]. 过程工程学报, 2019, **19**(5): 865–871.
Yang J, Zhang Q H, Yang C, et al. Micro-mixing characteristics of non-Newtonian fluid in a stirred tank agitated with different impellers [J]. Chin. J. Process Eng., 2019, **19**(5): 865–871.
- [11] Kawahara A, Sadatomi M, Nei K, et al. Characteristics of two-phase flows in a rectangular microchannel with a T-junction type gas-liquid mixer[J]. Heat Transfer Engineering, 2011, **32**(7/8): 585–594.
- [12] Busciglio A, Caputo G, Scargiali F. Free-surface shape in unbaffled stirred vessels: experimental study *via* digital image analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2013, **104**: 868–880.
- [13] Mohamed H M, Akimaro K, Michio S. Experimental investigation of gas - non-Newtonian liquid two-phase flows from T-junction mixer in rectangular microchannel[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, **72**: 263–274.
- [14] Sun H Y, Wang W J, Mao Z C. Numerical simulation of the whole three-dimensional flow in a stirred tank with anisotropic algebraic stress model [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2002, **10**(1): 15–24.
- [15] Chara Z, Kysela B, Konfrst J, et al. Study of fluid flow in baffled vessels stirred by a Rushton standard impeller[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, **272**(3): 614–628.
- [16] Liu N N, Wang W, Han J C, et al. A PIV investigation of the effect of disperse phase fraction on the turbulence characteristics of liquid - liquid mixing in a stirred tank[J]. Chemical Engineering Science, 2016, **152**: 528–546.
- [17] Yang F L, Zhou S J, An X H. Gas - liquid hydrodynamics in a vessel stirred by dual dislocated-blade Rushton impellers[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, **23**(11): 1746–1754.
- [18] Vlček P, Kysela B, Jirout T, et al. Large eddy simulation of a pitched blade impeller mixed vessel—comparison with LDA measurements[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016, **108**(SI): 42–48
- [19] Escamilla-Ruiz I A, Sierra-Espinosa F Z, García J C, et al. Experimental data and numerical predictions of a single-phase flow in a batch square stirred tank reactor with a rotating cylinder agitator[J]. Heat and Mass Transfer, 2017, **53**(9): 2933–2949.
- [20] Wang W J, Mao Z S. Numerical simulation of gas-liquid flow in a stirred tank with a Rushton impeller[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2002, **10**(4): 385–395.
- [21] Roman R V, Tudose R Z. Studies on transfer processes in mixing vessels: effect of particles on gas-liquid mass transfer using modified Rushton turbine agitators[J]. Bioprocess Engineering, 1997, **17**(6): 361–365.
- [22] Roman R V, Tudose R Z. Studies on transfer processes in mixing vessels: power consumption of the modified Rushton turbine agitators in three-phase systems[J]. Bioprocess Engineering, 1997, **17**(5): 307–316.
- [23] Roman R V, Tudose R Z. Studies on transfer processes in mixing vessels: effect of particles on gas-liquid hydrodynamics using modified Rushton turbine agitators[J]. Bioprocess Engineering, 1997, **16**(3): 135–144.
- [24] Liu B, Zhang Y, Chen M, et al. Power consumption and flow field characteristics of a coaxial mixer with a double inner impeller[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, **23**(1): 1–6.
- [25] Bao Y, Li T, Wang D, et al. Discrete element method study of effects of the impeller configuration and operating conditions on particle mixing in a cylindrical mixer[J]. Particuology, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.02.002>
- [26] Reviol T, Kluck S, Böhle M. A new design method for propeller mixers agitating non-Newtonian fluid flow[J]. Chemical

- Engineering Science, 2018, **190**: 320-332.
- [27] 钟天铖, 汤文成, 刘碧茜. 推进式搅拌器固液混合的计算流体力学模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, **46**(4): 713-719.
- Zhong T C, Tang W C, Liu B X. CFD simulation of solid-liquid mixing in stirred vessel by propeller agitator[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, **46**(4): 713-719.
- [28] 刘培坤, 张瑞, 杨兴华, 等. 涡轮式与推进式搅拌釜的数值模拟研究[J]. 化工机械, 2017, **44**(1): 84-87+96.
- Liu P K, Zhang R, Yang X H, et al. Analysis of sealing structure reliability for vulcanizing tank connection[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2017, **44**(1): 84-87+96.
- [29] 阙甲球. 推进式搅拌器的机械设计[J]. 化工炼油机械, 1983, **12**(6): 38-47.
- Que J Q. Mechanical design of propeller agitators[J]. Chemical Refining Machinery, 1983, **12**(6): 38-47
- [30] Tian F, Shi W D, Jiang H. Comparison of sewage treatment mixer in three pool face boundary conditions[C]// 2nd International Conference on Frontiers of Mechanical Engineering and Materials Engineering (MEME 2013). Hong Kong, China, 2014.