

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.04.013

基于CFD的双层混合涡轮式搅拌器优化

周振¹, 王萌², 张梦雪¹, 朱强¹, 陈璇¹, 盘赛昆^{1*}

(1. 江苏海洋大学 食品科学与工程学院, 江苏 连云港 222000;
2. 江苏海洋大学 机械工程学院, 江苏 连云港 222000)

摘要:为了解决50 L通用型液体发酵罐搅拌器组合选型多而复杂的问题,课题组设计了8种符合小型发酵罐需求的双层搅拌器组合。采用CFD软件FLUENT,选取 κ - ϵ 方程湍流模型对发酵罐进行数值模拟,计算方法采用有限体积法离散守恒方程,压力-速度耦合使用SIMPLE算法,差分格式采用二阶迎风进行收敛;通过对发酵罐内流场的速度云图、矢量图、速度分布曲线、搅拌功率等进行对比分析,研究不同搅拌器组合搅拌过程中液相混合效果;选取混合效果较优的搅拌器组合,进行气、液两相混合验证。结果表明:上层为斜叶圆盘式搅拌桨、下层为直叶圆盘式搅拌桨组合发酵罐搅拌时效果较为理想,且罐内最高速度能达到0.28 m/s,搅拌功率仅为5.63 W。模拟结果为发酵罐搅拌器组合的设计与选型提供了重要的参考。

关键词:涡轮搅拌器;多级搅拌;计算流体动力学; κ - ϵ 方程湍流模型;有限体积法;FLUENT

中图分类号:TQ920.5;TH164 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)04-0079-07

Optimization of Double-Layer Hybrid Turbine Agitator Based on CFD Simulation

ZHOU Zhen¹, WANG Meng², ZHANG Mengxue¹, ZHU Qiang¹, CHEN Xuan¹, PAN Saikun^{1*}

(1. School of Food Science and Engineering, Jangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222000, China;
2. School of Mechanical Engineering, Jangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222000, China)

Abstract: In order to solve the problem of multiple and complex agitator combination selection for the 50 L general-purpose liquid fermentation tank, eight kinds of double-layer agitator combinations that meet the needs of small fermentation tanks were designed. The κ - ϵ equation turbulence model was used to simulate the fermentation tank by using CFD software FLUENT. The finite volume method discrete conservation equation was used as the calculation method, the SIMPLE algorithm was used for pressure-velocity coupling, and the second order upwind scheme was used for differential format convergence. Through the contrastive analysis of the velocity cloud diagram, vector diagram, velocity distribution curve and mixing power of the flow field in the fermentation tank, the liquid phase mixing effect in the mixing process of different agitator combinations was studied. The agitator combination with better mixing effect was selected to verify the gas-liquid two-phase mixing. The results show that the mixing effect of the fermentation tank was ideal when the inclined blade disc impeller was on the top and the straight blade disc impeller was on the bottom, and the maximum speed in the tank could reach 0.28 m/s and the mixing power is only 5.63 W. The simulation results provide an important reference for the design and selection of fermenter agitator combinations.

Keywords: turbine stirrer; multistage mixing; CFD (Computational Fluid Dynamics); κ - ϵ equation turbulence model; finite volume method; FLUENT

收稿日期:2022-03-16;修回日期:2022-05-20

基金项目:横向课题基金:液态生物反应器关键技术研发及产业化研究(HKK202076)。

第一作者简介:周振(1996),男,江苏江阴人,硕士研究生,主要研究方向为发酵设备。通信作者:盘赛昆(1974),男,广西融水人,博士,教授,主要研究方向为应用微生物。E-mail:pskgx@163.com

搅拌使 2 种或多种不同物质达到均匀混合的效果,是发酵、酿酒、石油、生化工程以及废水处理等工艺中常见的混合技术^[1]。各式各样的搅拌器应用于不同的混合和搅拌工艺中。其中,涡轮式搅拌器是应用最广泛的搅拌器。涡轮式搅拌器拥有较大的剪切力,可以有效地满足各种搅拌需求,是小直径发酵罐高速搅拌的首选。涡轮式搅拌器常用的有直叶圆盘式(PY)、斜叶圆盘式(ZY)、直叶开启式(SK)和斜叶开启式(MK)4 种类型。直叶式搅拌器与斜叶式搅拌器相比,拥有较大的剪切力,可以达到多种搅拌需求;斜叶式搅拌器既有径流特性,又有强大的轴向动流,有利于物质充分混合^[2-3]。

目前,CFD 软件模拟计算搅拌流场已在设计领域广泛应用^[4]。董敏等^[5]和杨杰^[6]基于 Navier-Stokes 方程和 $\kappa\text{-}\varepsilon$ 湍流模型分析双螺旋带和 6 叶斜涡轮桨不同组合位置的内部流场数据,对比搅拌器在特定界面的轴向速度矢量图、径向矢量图以及速度云图,认为上双螺旋带下涡轮桨组合在混合效果、轴向流动、搅拌效率上优于上涡轮桨下双螺旋带组合。梁瑛娜等^[7]对直叶圆盘式搅拌桨的流场和混合时间进行模拟,并分析了其流动特性。Nere 等^[8]采用 $\kappa\text{-}\varepsilon$ 方程进行模拟,分析了不同角度圆盘式搅拌桨的混合效果。Rao 等^[9]对传统涡轮搅拌器进行改造,桨叶引入单、双矩形和 V 形切割的结构,经过 CFD 仿真实验得出 V 型切割桨叶的功耗小于矩形切割桨叶的功耗。刘敏珊等^[10]和 Bach 等^[11]采用多重参考系法对不同搅拌桨倾斜角度进行比较,发现当搅拌桨斜叶为 45° 时单位能耗最低。然而,目前针对小型发酵罐尤其是 50 L 液体搅拌式发酵罐的流场研究不多,多侧重于单一用途发酵罐的特殊工况的分析。

以 50 L 液体发酵罐为研究对象,笔者利用 CFD 软件对不同搅拌器组合的流场进行数值模拟,探究不同搅拌器组合下发酵罐内流场变化,为发酵罐搅拌器设计选型提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 发酵罐搅拌器结构

笔者采用 Design Modeler 软件建立发酵罐的三维模型,发酵罐的结构如图 1 所示。搅拌直径 $D = 200$

mm,高度 $H = 340$ mm,搅拌器的叶径 $d = 70$ mm,厚度为 3 mm,搅拌器间距 $s = 160$ mm,距底间隙为 $C = 105$ mm,均匀分布 4 块挡板,宽度为 10 mm,介质为液态水,搅拌转速为 300 r/min。

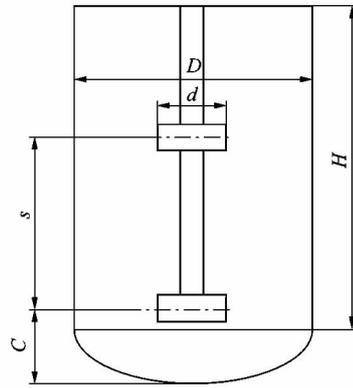


图 1 发酵罐结构

Figure 1 Structure of fermenter

斜叶式搅拌器和直叶式搅拌器的特点不同,在不同使用位置,搅拌效果有所差异。根据结构特点,搅拌器结构可分为 8 种组合方式,如表 1 所示。

表 1 搅拌器组合

Table 1 Agitator combination

方案	下层	上层	组合简称
1	直叶圆盘式	斜叶圆盘式	A 型
2	直叶圆盘式	斜叶开启式	B 型
3	直叶开启式	斜叶圆盘式	C 型
4	直叶开启式	斜叶开启式	D 型
5	斜叶圆盘式	直叶圆盘式	E 型
6	斜叶圆盘式	直叶开启式	F 型
7	斜叶开启式	直叶圆盘式	G 型
8	斜叶开启式	直叶开启式	H 型

1.2 数学模型

流体流动需要满足物理守恒定律,即满足质量守恒方程和动量守恒方程。

1.2.1 质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i) + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i v_i); \quad (1)$$

$$\partial_i + \partial_g = 1.0. \quad (2)$$

式中: ρ_i 代表各相的密度, kg/m^3 ; α_i 为相含率,且

$\sum \alpha_i = 1, \%$; v_i 为平均速度, m/s; i 代表气相或者液相; g 表示气相, l 表示液相。

1.2.2 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i v_i) + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i v_i v_i) = -\alpha_i \nabla p' + \nabla \cdot (\alpha_i \mu_{\text{eff},i} + \nabla \mu_i^T) \pm F_{g,l} + \alpha_i \rho_i g \quad (3)$$

式中: p' 为修正压力, Pa; $F_{g,l}$ 是气液两相相互作用的合力, N; $\alpha_i \rho_i g$ 为相所受重力, N。

$$p' = p_0 + \frac{2}{3} \mu_{\text{eff},l} \nabla \cdot v_l + \frac{2}{3} \rho_l k_l \quad (4)$$

式中: $\mu_{\text{eff},l}$ 为液相的有效黏度, Pa·s; p_0 为压力, Pa; k_l 为液相湍动能。

笔者采用 FLUENT 求解流体流动问题。

1.3 CFD 模拟计算

建模完成后, 将模型导入到 FLUENT 中, 使用 Gambit 自动网格进行三维网格划分, 如图 2。网格划分单元质量平均值为 0.83, 最小值为 0.50, 网格总数为 326 万个, 网格节点为 108 万个。模拟采用 MRF 多重参考系解决流动模型, 计算模型采用标准 κ - ε 双方程湍流模型。整个模型划分为静止区域和动区域 2 个区域, 搅拌器桨叶区域设置为动区域, 发酵罐内其他区域设置为静区域, 搅拌轴设置为动壁面, 转速设置为绝对速度, 搅拌桨叶设置为相对速度。计算方法采用有限体积法离散守恒方程, 压力-速度耦合使用 SIMPLE 算法, 差分格式采用二阶迎风进行收敛。迭代次数为 1 000 次。采用 FLUENT-tecplot 软件进行后处理。

1.4 气液两相混合过程模拟

对选择的较优搅拌桨组合进行气液两相模拟混合过程。以相对密度 998.2 kg/m^3 、相对黏度 $1 \times 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 的水为液相, 以相对密度 1.225 kg/m^3 、相对黏度 $1.79 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 的空气为气相。气体分布器为均匀开孔的环形分布器, 每个小孔为直径 2.5 mm , 共 10 个, 均匀分布在下表面, 如图 2(a) 所示。液相的体积分数和速度大小均为 0。进气速度为 5 m/s , 气体入口处的湍流强度与湍流黏性比为 10%, 出口压力为 0.1 MPa 。发酵罐和气体分布器的壁面为静止壁面, 搅拌桨与转轴的壁面为动边界。搅拌转速为 300 r/min 。利用组分输送模型进行混合。通过不同时刻气相的分布来分析发酵罐内流体的混合效果。

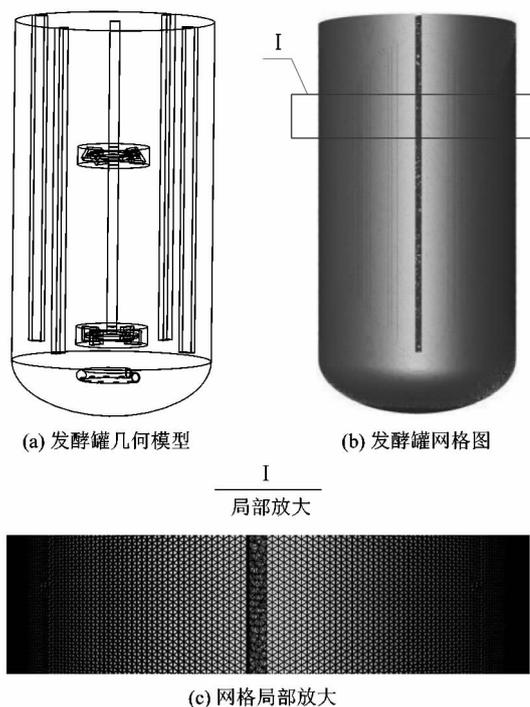


图 2 发酵罐的几何模型和网格划分

Figure 2 Geometric model and meshing of fermenter

2 结果与讨论

由双层混合涡轮式搅拌器组成的发酵罐中, 由于不同桨型组合, 罐内所形成的流场也不同。这对发酵罐中单相流场、气液两相混合的效果产生影响。经 CFD 软件数值模拟, 分析铅垂面上达到稳态后的速度云图和矢量图; 比较不同组合搅拌桨的流场特性差异, 选取高搅拌速度、低搅拌功率的搅拌桨组合, 进行气液两相模拟混合验证。

2.1 速度场分析

通过观察不同搅拌器组合的铅垂面 ($Y = 0 \text{ m}$) 和水平面 ($Z = 0.1 \text{ m}$) 的速度云图, 可以发现: 双层圆盘式搅拌桨相较于其他搅拌桨组合, 其中间区域流场低速区域范围较小, 高速区域并不集中, 流场流动效果较好, 如图 3 所示; 在搅拌桨叶边缘的流体速度较大, 越远离搅拌桨叶速度越小, 且能形成较大的漩涡, 如图 4 所示。由于圆盘式搅拌器的搅拌面积较大, 所以流场速度大于开启式搅拌器, 也不容易出现“搅拌死区”, 搅拌更加均匀。

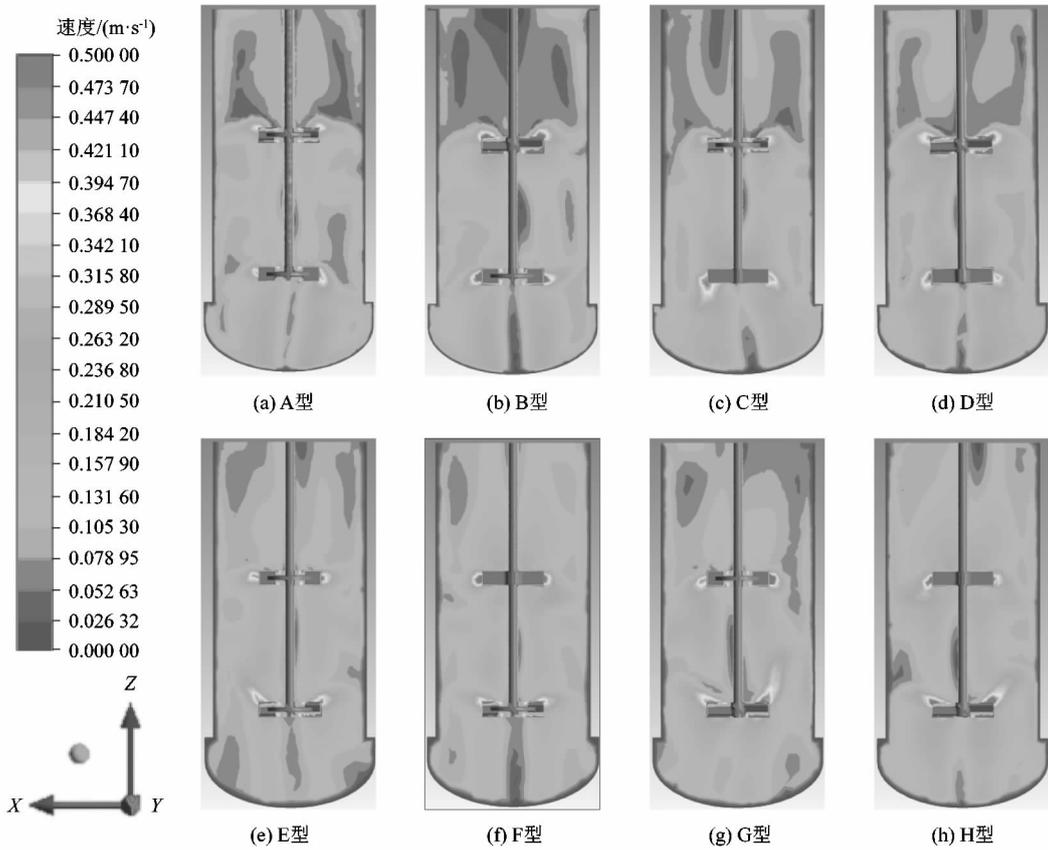


图3 不同搅拌器组合的铅垂面速度云图

Figure 3 Vertical velocity nephogram of different agitator combinations

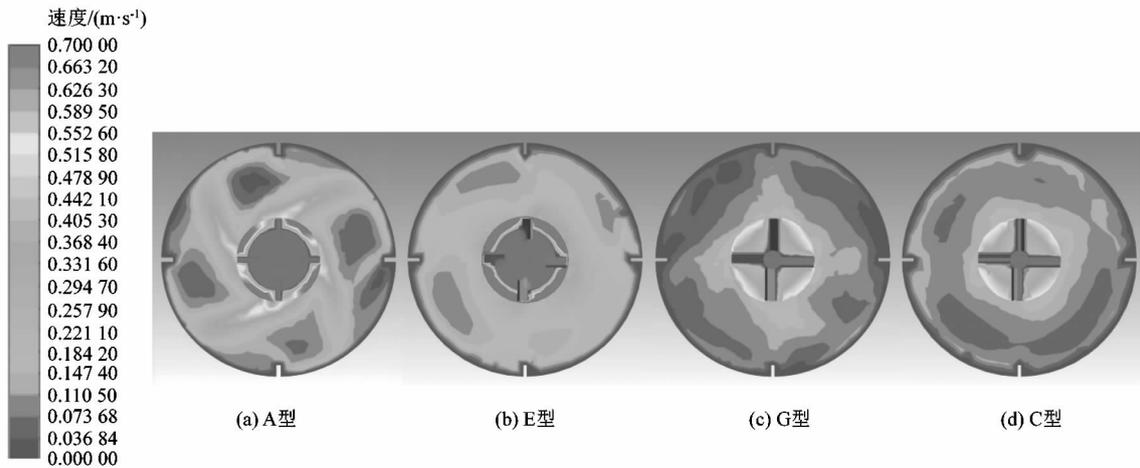


图4 不同搅拌器组合的水平截面速度云图

Figure 4 Horizontal velocity nephogram of different agitator combinations

通过观察不同搅拌器组合的铅垂面速度矢量图(图5)发现,直叶式搅拌器作为径向流桨,方向由桨叶至发酵罐壁,再向上或向下流动,在搅拌桨叶上、下形

成漩涡,涡心的范围较广,可以满足发酵罐内中、下层的搅拌需求。斜叶式搅拌器则会形成轴向流场,能够增加流体的轴向流动范围和流体速度,但在搅拌桨附

近形成的漩涡涡径较小,搅拌范围较小。此结果与赵行等^[12]的试验结果一致。A 型搅拌器组合在整个发

酵罐中,产生了至少 6 个流场旋涡,多于其他组合,有较好的混合效果。

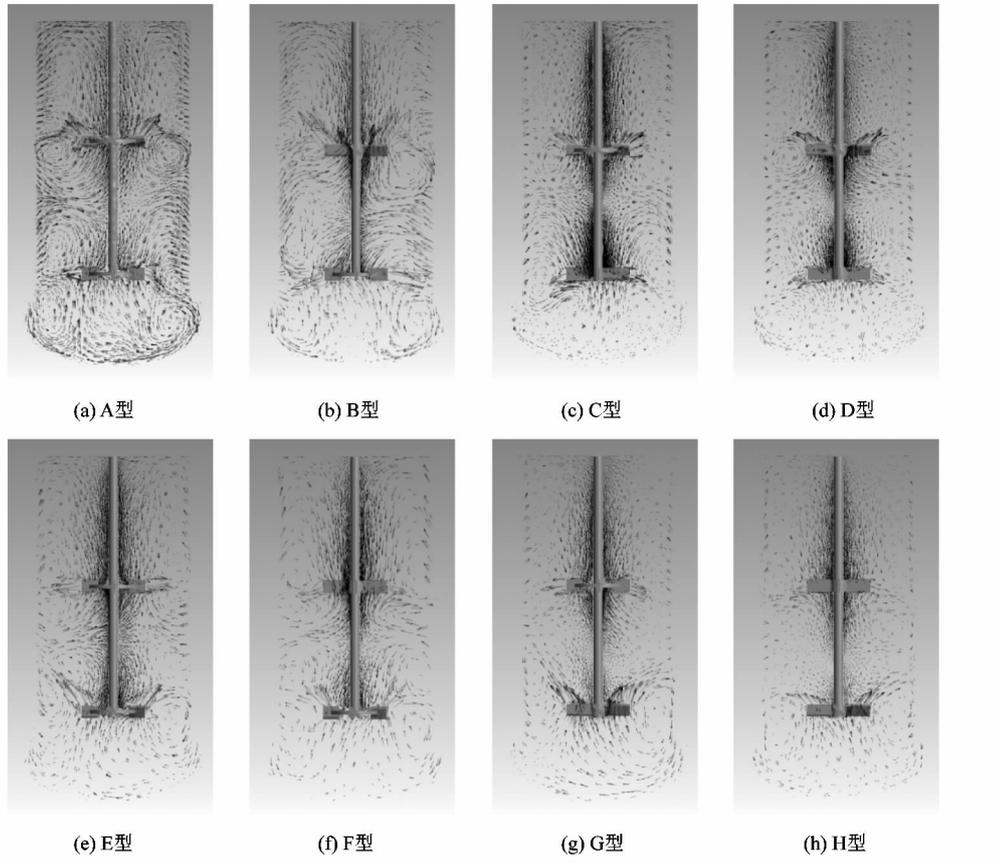


图 5 不同搅拌器组合的铅垂面速度矢量图

Figure 5 Vertical velocity vector diagram of different agitator combinations

在发酵罐铅垂面($Y=0\text{ m}$) $X=0.1\text{ m}$ 处计算不同搅拌器组合在不同高度的速度,分布曲线如图 6 所示。在图中可以观察到,圆盘式搅拌器的速度峰值($>$

0.25 m/s)高于开启式搅拌器的峰值($\leq 0.25\text{ m/s}$),其中 A 型、E 型组合的整体平均速度优于其他搅拌组合。

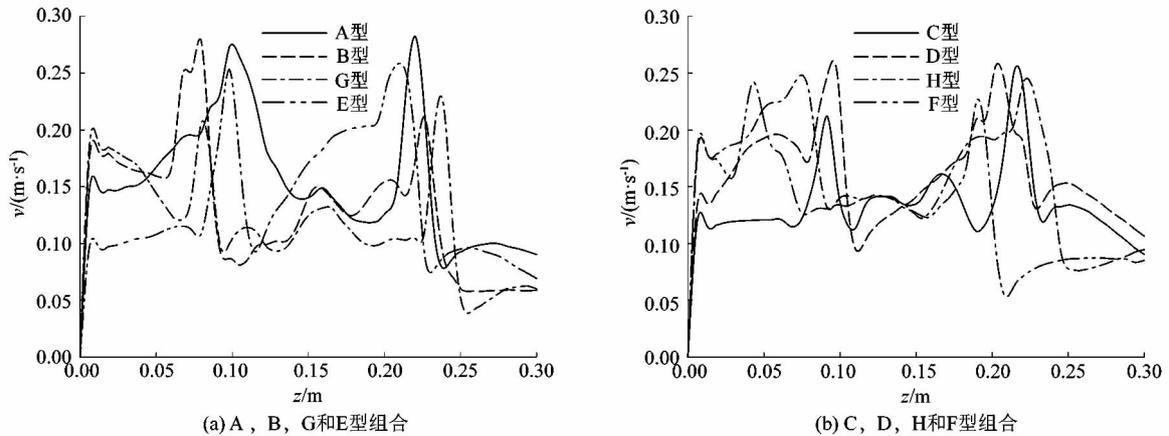


图 6 不同搅拌器组合的速度分布

Figure 6 Velocity distribution diagram of different agitator combinations

模拟计算不同搅拌器组合的搅拌功率,结果如图 7 所示。搅拌功率大小顺序为组合 C, E, G, A, H, D, F, B 型。结合各组合的桨型与搅拌功率可以看出斜叶式搅拌桨的功率要比直叶式的搅拌桨功率大,此结果与姚晨明^[13]和 Huang 等^[14]的结果一致。搅拌速度较优的组合 A 的搅拌功率约为最大功率的 86.1%,并且模拟数值在计算值 6.83 W 范围内,模型可靠^[15]。因此,直叶圆盘式搅拌桨在下层、斜叶圆盘式搅拌桨在上层时的搅拌器组合性能更佳,具有较大的剪切力和较小的搅拌功率,能够满足设计要求。

2.2 气液两相混合模拟

发酵罐内气相在液相中不同时刻的气体体积分数分布情况如图 8 所示。进气口如图 8(a) 所示,此时气体还未扩散。在较短时间内,气体向上扩散,但仍成团状聚集在搅拌桨桨叶旁;随着时间的延长,通气量增加,受到下层直叶圆盘式搅拌桨的横向剪切力和上层

斜叶圆盘式搅拌桨的循环流作用力,气体向上以较为均匀的形式扩散,气体能与液体较好地混合。

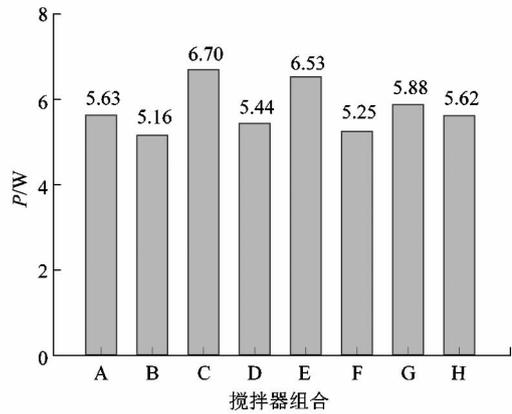


图 7 不同搅拌器组合的搅拌功率
Figure 7 Mixing power of different agitator combinations

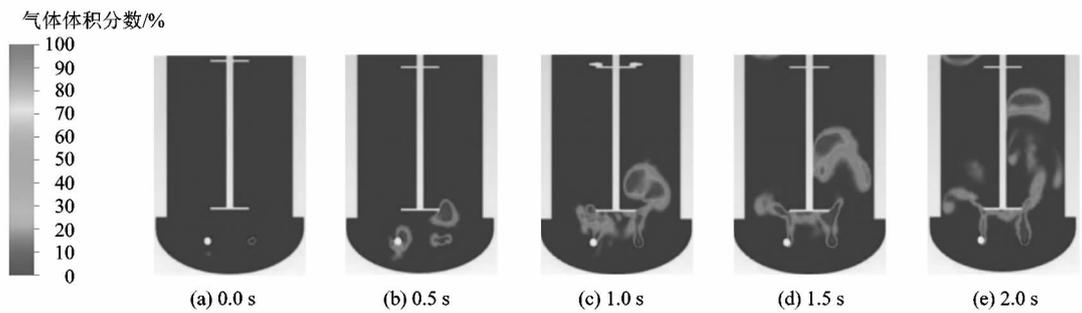


图 8 不同时刻气相分布
Figure 8 Gas phase distribution at different times

3 结论

笔者以课题组研发的 50 L 液体发酵罐为模型,基于 CFD 技术模拟双层混合涡轮式搅拌器的流场,考察了 8 种搅拌器组合对流场分布及搅拌功率的影响。得出结论:

- 1) 对于小型液体发酵罐,圆盘式搅拌桨比开启式搅拌桨搅拌速度大,搅拌功率较高,但不同搅拌器组合方式会对搅拌速度与搅拌功率产生影响;
- 2) 直叶桨与斜叶桨的组合能够有效促进气液两相混合;
- 3) 本研究偏向于整体,并未分析局部流场变化,之后应深入探讨;

4) 组合 A 结果为课题组下一步研发发酵罐提供了重要参考。

参考文献:

- [1] BEUN J J, VAN LOOSDRECHT M C M, HEIJNEN J J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor[J]. Water research, 2002, 36(3): 703.
- [2] CONTI F, WIEDEMANN L, SONNLEITNER M, et al. Monitoring the mixing of an artificial model substrate in a scale-down laboratory digester[J]. Renewable Energy, 2019, 132: 351 - 362.
- [3] AKITO Y, HITOSHI O, SYUNSUKE S, et al. Effect of impeller and gas stirring on agglomeration behavior of polydisperse fine particles in liquid: fundamentals of high temperature processes [J]. ISIJ International, 2021, 61(6): 1775 - 1783.