

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.03.013

商新月, 韩定强, 舒雷, 等. 鱼尾型搅拌桨设计及在羧甲基纤维素钠溶液中的应用 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(3): 147-158.

鱼尾型搅拌桨设计及在羧甲基纤维素钠溶液中的应用

商新月¹, 韩定强¹, 舒雷¹, 杨明金^{1,2},
邹祥³, 杨玲^{1,2}, 蒲应俊^{1,2}

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 丘陵山区农业装备重庆市重点实验室, 重庆 400715;
3. 西南大学 药学院, 重庆 400715

摘要: 搅拌桨是生物反应器的核心部件, 直接影响反应釜内流体的搅拌混合和气液分散性能。基于双色刺尻鱼 (*Centropyge Bicolor*) 尾鳍轮廓特征和仿生学原理, 设计了一种鱼尾型搅拌桨—FT 桨 (Fishtail Turbine), 应用于羧甲基纤维素钠 (CMC) 溶液的搅拌混合操作。结合计算流体动力学 (CFD) 和粒子图像测速 (PIV) 技术, 研究了 FT 桨在纯水、CMC 溶液中的搅拌混合和气液分散性能, 并与传统 RT 桨 (Rushton Turbine) 进行了对比。结果表明: ① 对于单相流, 与 RT 桨相比, FT 桨能增大流场速度、端动能作用区域; 搅拌纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时, 端动能最大值分别增加 39.47%、23.33%、18.31%, 平均增加 31.03%。② 对于气液两相流, 与 RT 桨相比, FT 桨能增大高气含率区域, 促进气液分散; 搅拌气液两相纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时, 总体气含率分别相对增加 8.62%、9.19%、2.58%, 平均相对增加 5.94%, 搅拌功耗分别降低 4.58%、4.54%、4.98%, 平均降低 4.70%。与 RT 桨相比, FT 桨搅拌 CMC 溶液具有更优的搅拌混合和气液分散性能, 应用前景广阔。

关键词: 鱼尾型搅拌桨; 羧甲基纤维素钠; 搅拌混合;

气液分散; 仿生; 计算流体动力学

中图分类号: TQ630.5⁺4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)03-0147-12

Design of Fishtail Turbine and Its Application in the Sodium Carboxymethyl Cellulose Solution

SHANG Xinyue¹, HAN Dingqiang¹, SHU Lei¹, YANG Mingjin^{1,2},
ZOU Xiang³, YANG Ling^{1,2}, PU Yingjun^{1,2}

收稿日期: 2022-12-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31571816)。

作者简介: 商新月, 硕士研究生, 主要从事机械设计与理论研究。

通信作者: 杨明金, 教授, 博士研究生导师。

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Regions, Chongqing 400715, China;
3. College of Pharmaceutical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The mixing paddle, as the core component of bioreactors, directly affects the mixing performance and gas-liquid dispersion performance of the fluid in the bioreactor. According to the contour characteristics of the tail fins of centropgye bicolor, the fishtail turbine (FT turbine) was designed based on bionics. Then the FT turbine was applied to the mixing operation of the sodium carboxymethyl cellulose (CMC) solution. The combination of computational fluid dynamics (CFD) and particle image velocimetry (PIV) was employed to study and compare the mixing performance and gas-liquid dispersion performance of FT turbine and traditional rushton turbine (RT turbine) in pure water and CMC solution. The results showed that: ① In the single-phase flow, compared with the RT turbine, the FT turbine enhanced the flow field velocity and turbulent kinetic energy mixing areas. When stirring pure water and CMC solution with mass fraction of 0.25% and 0.5%, the maximum values of the turbulent kinetic energy were increased by 39.47%, 23.33% and 18.31%, respectively, with an average increase of 31.03%. ② In the gas-liquid two-phase flow, compared with the RT turbine, the FT turbine increased the high gas holdup area and promoted the gas-liquid uniform dispersion. When stirring the gas-liquid two-phase flow of pure water and CMC solution with mass fraction of 0.25% and 0.5%, the overall gas holdup was relatively increased by 8.62%, 9.19% and 2.58%, respectively, with an average relative increase of 5.94%, and the agitation power consumption was decreased by 4.58%, 4.54% and 4.98%, respectively, with an average decrease of 4.70%. The FT turbine has better mixing performance and gas-liquid dispersion performance and wider application prospects than RT turbine when mixing the CMC solution.

Key words: fishtail turbine; sodium carboxymethyl cellulose; stirring and mixing; gas-liquid dispersion; bionics; computational fluid dynamics

羧甲基纤维素钠(Sodium Carboxymethyl Cellulose, CMC)属于纤维素衍生物,是一种离子型纤维素胶,常作为增稠剂、稳定剂、乳化剂、成膜剂等用于冷食、饮料、面制品等食品中^[1-2]. 生物反应器搅拌混合食品原料是食品加工过程中的重要生产工艺,广泛应用于食品和饮料加工行业^[3]. 搅拌桨是生物反应器的核心部件,优化搅拌桨结构和工作参数有利于促进反应釜内流体传热传质以及提高混合的均匀性^[4],进而提高食品的加工品质^[5]. 目前,生物反应器搅拌桨的研发主要基于传统设计理论,忽略流体力学方面的深入研究,创新性应用成果缺乏^[6-8]. 近年来,仿生学已逐渐应用到很多工程领域^[9],为生物反应器搅拌桨的设计与优化提供了新思路. 刘明慧等^[10]基于人与动物消化系统工作机制提出了一种柔性反应器,该反应器对单相牛顿流体混合表现良好. 刘作华等^[11-12]借鉴鸟类飞行、鱼类游动时翅膀、鱼鳍与流体的相互作用方式,提出了一种仿生刚柔桨,有利于单相牛顿流体高效混合. 张志丰等^[13]以蜈蚣挖掘足爪趾为仿生原型,得到了仿生桨叶,实现了糖化锅中固液悬浮液“两低两高”的设计目标. 韩定强等^[14]基于鲸鱼尾鳍游动提出了一种鲸尾型搅拌桨,提高了单相牛顿流体流场混沌程度. 上述仿生搅拌桨主要应用于基于牛顿流体单相流的搅拌和混合,缺乏基于非牛顿流体的应用研究. 计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)技术可应用于搅拌混合领域,测试分析流场速度,获悉流场分布和流动特性^[15-17]. 方玉建等^[18-19]利用 PIV 技术得到了反应釜内搅拌非牛顿流体时的流场速度、湍动能、涡量分布等流场流动信息,并与数值模拟结果相吻合. Wang 等^[20-21]用 CFD 和 PIV 技术相结合的方法得到了搅拌桨搅拌气液两相流体时的气相分布、液相速度、搅拌功耗、局部气泡大小等流场信息. 综上,CFD 和 PIV 技术能为研究流场的搅拌混合和气液分散性能提供参考.

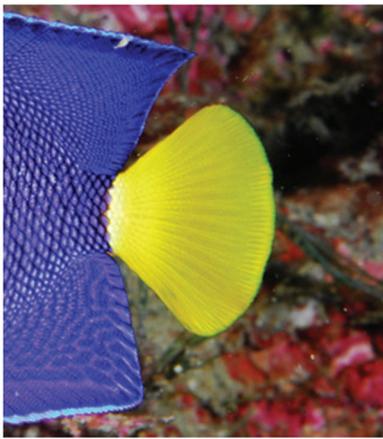
本文选择生性凶猛、警惕性高、游速快、生存能力强的双色刺尻鱼(*Centropyge Bicolor*)的尾鳍作为仿生对象,通过 Matlab 提取尾鳍轮廓坐标,基于尾鳍轮廓特征和仿生学原理,设计了一种 FT 桨(Fishtail Turbine),结合 CFD 和 PIV 技术,研究了 FT 桨在纯水、CMC 溶液单相、气液两相中搅拌混合和气液分散性能,并与传统 RT 桨(Rushton Turbine)进行了对比,为新型高性能搅拌桨的设计提供参考。

1 材料与方法

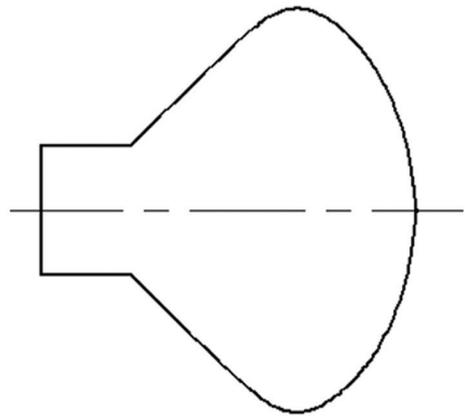
1.1 搅拌系统设计

1.1.1 FT 桨仿生设计

鱼尾尾鳍沿保持身体稳定性好、阻力小、游速快等方向进化其轮廓形状,鱼尾游动时与水相互作用,产生了不同于矩形叶片的涡结构,使流场混乱程度增加,提高了能量传播效率^[22-23]。以生性凶猛、警惕性高、游速快、生存能力强的典型圆尾双色刺尻鱼尾鳍作为仿生对象,选取双色刺尻鱼尾鳍正面图片(图 1a)进行图像处理。通过 Matlab 对图片进行消噪、二值化、中值滤波处理,采用 Canny 算法提取尾鳍轮廓数据,获取尾鳍轮廓坐标。考虑到双色刺尻鱼尾鳍形状对称性和拟合精确性,通过 Matlab 拟合工具箱对尾鳍上半部分轮廓坐标点进行分段曲线拟合,对称得到尾鳍轮廓拟合曲线,如图 1b 所示。



a. 双色刺尻鱼尾鳍外形



b. 尾鳍轮廓拟合曲线

图 1 尾鳍轮廓拟合

参考化工行业标准《圆盘涡轮式搅拌器》(HG/T 3796.5—2005)设计 RT 桨。在此基础上,基于与 RT 桨桨叶面积等效原则设计 FT 桨桨叶,在 SolidWorks 2016 中输入尾鳍轮廓拟合曲线表达式,调整缩放因子至 2 片桨叶面积相等,得到 FT 桨桨叶,如图 2 所示。FT 桨和 RT 桨的桨叶厚度均为 2 mm。

1.1.2 搅拌系统模型

采用与文献[14]中相同的单相流模型。在单相流模型基础上,两相流模型加装有气体分布器。反应釜直径 $T=200$ mm,釜高 $H_1=240$ mm,釜厚 $m_1=5$ mm。为改善搅拌效果,釜内设置 4 块标准挡板(均匀分布),挡板宽度 $B=19$ mm,厚度 $m_2=3$ mm。PIV 实验和 CFD 仿真模拟时,液面高度 $H_2=190$ mm,搅拌桨离釜底高度 $C_1=47.5$ mm,气体分布器离釜底高度 $C_2=10$ mm,如图 3 所示。

1.2 实验方法

1.2.1 CMC 溶液流变特性测量

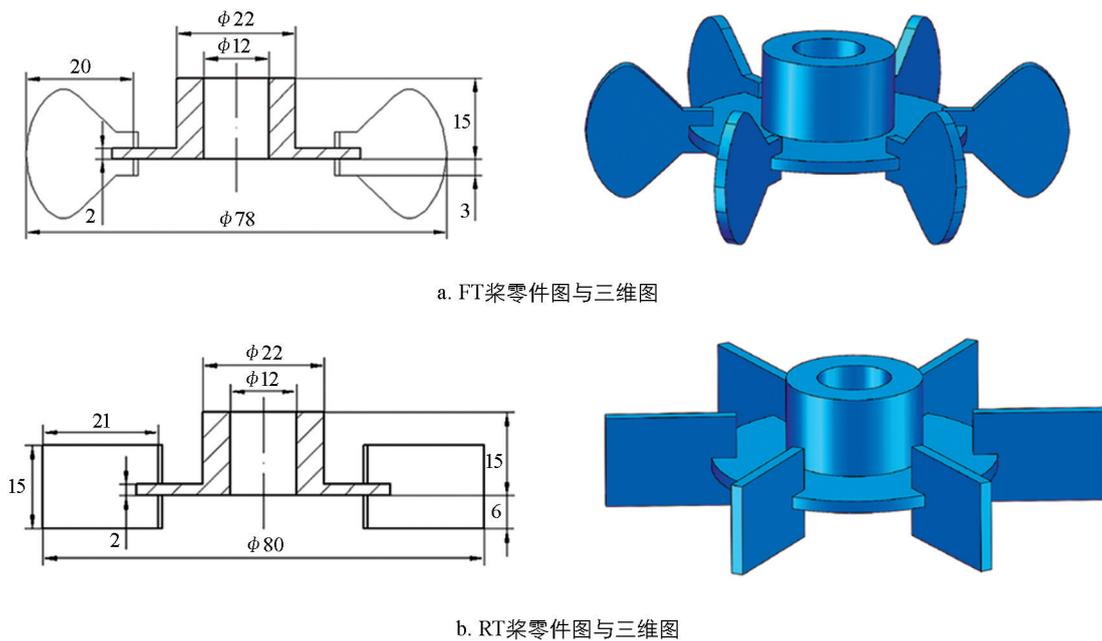
制备质量分数为 0.25%、0.5% 的 CMC 溶液,分别简称 0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液,用于后续 PIV 测试。采用 DHR-1 旋转流变仪测量 CMC 溶液流变特性,用于后续 CFD 仿真模拟。测量样品体积各 5 mL,剪切速率范围为 $0.1\sim 100$ s^{-1} ,每一样品测量 100 个黏度数据。

采用 Power-law 模型描述 CMC 溶液流变特性,模型方程为^[24]:

$$\mu_a = K(\dot{\gamma}_a)^{n-1} \quad (1)$$

式中: μ_a 为表观黏度; γ_a 为表观剪切速率; K 为稠度指数; n 为流动行为指数.

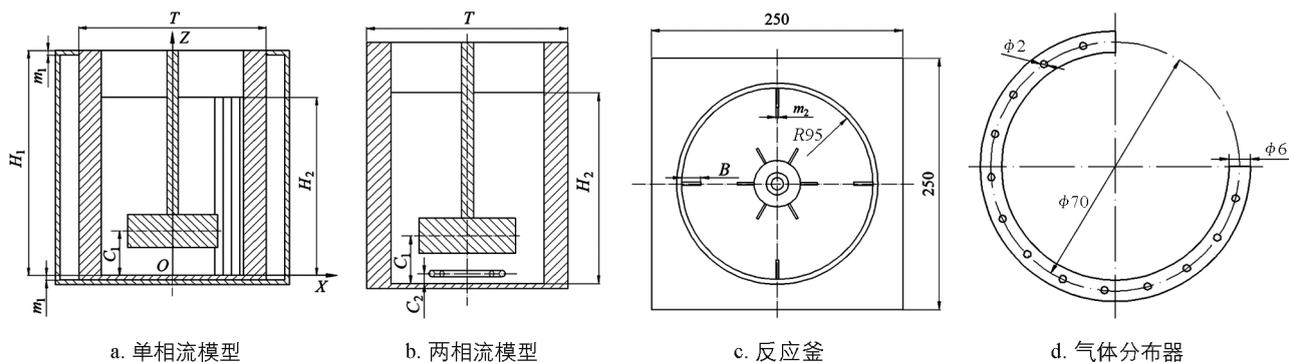
对测量数据进行拟合处理, 得到 0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液的 Power-law 模型方程分别为 $\mu_a = 0.1664(\gamma_a)^{-0.662}$ 和 $\mu_a = 0.3172(\gamma_a)^{-0.678}$, 决定系数 R^2 分别为 0.976 和 0.980.



a. FT 桨零件图与三维图

b. RT 桨零件图与三维图

图 2 FT 桨仿生设计



a. 单相流模型

b. 两相流模型

c. 反应釜

d. 气体分布器

图 3 搅拌系统设计

1.2.2 PIV 测试

采用与韩定强等^[14]相同的方法进行 PIV 测试. 测试设备为北京立方天地科技发展有限公司生产的 2D-PIV 系统, 粒子图像分析系统软件为 MicroVec V3.6. 反应釜由透明有机玻璃制成, 容积为 5 L. 为减小激光照射反应釜圆柱面产生折射对测试结果的影响, 将反应釜固定在 250 mm×250 mm×250 mm 透明有机玻璃制成的方容器内, 对称布置. 容器壁厚为 5 mm. 方容器和反应釜之间加入纯水或 CMC 溶液, 液面高度与反应釜内液面高度一致.

为避免挡板对激光照射造成干扰, 设置挡板所在平面 $b-b$ 与方容器对称平面 $c-c$ 之间夹角为 5° , 激光器产生的片光源沿 $c-c$ 面入射, 厚度为 1.0 mm, 如图 4 所示. 相机拍摄区域为反应釜左下 150 mm×150 mm 区域. 搅拌桨转速设定为 120 r/min, 跨帧延时时间设定为 1 000 μs . 每次拍摄 600 张 PIV 图像, 经时均化处理得到 $c-c$ 平面的时均速度. 图 5 为反应釜坐标系示意图.

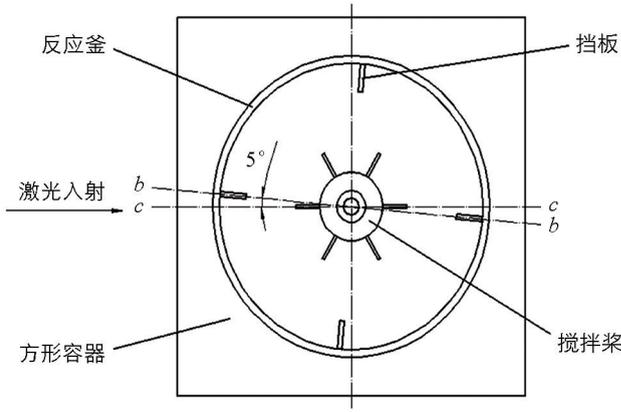


图 4 激光入射平面

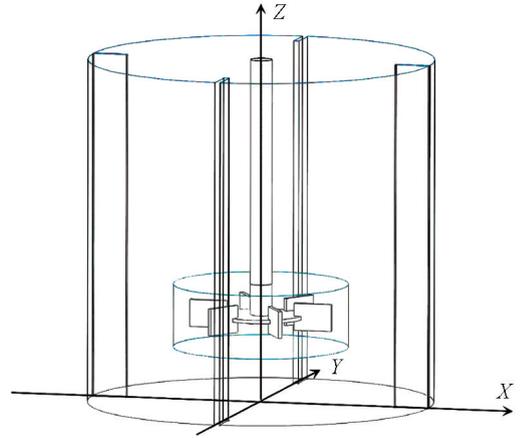


图 5 反应釜坐标系示意图

湍动能根据 PIV 测试速度计算得出^[14]:

$$k = \frac{3}{4}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (2)$$

式中: k 为湍动能; $\overline{u'^2}$ 和 $\overline{v'^2}$ 分别为径向和轴向脉动速度平方均值。

1.2.3 气含率测量

采用金瓷科技生产的超声波距离传感器 NU200F 18TR-S-1000(精度 ± 0.1 mm)测量气含率, 用于两相流模型可靠性验证和搅拌性能分析。搅拌桨转速设定为 400 r/min, 通气速率为 9.0 L/min^[24-25], 20 次重复。气含率的计算公式为:

$$\alpha = \frac{H_g - H_0}{H_g} \times 100\% \quad (3)$$

式中: α 为气含率; H_g 为通气后反应釜内液面高度; H_0 为通气前反应釜内液面高度。

1.3 数值模拟

1.3.1 数学模型

单相流采用 Realizable k - ϵ 湍流模型, 其流体控制方程为^[26]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (5)$$

式中: k 为湍流动能; ϵ 为湍流动能耗散率; ρ 为流体密度; t 为流动时间; u 为瞬时速度; μ 为流体动力黏度; μ_t 为湍流黏性系数; ν 为流体运动黏度; G_k 表示由平均速度梯度产生的湍流动能; σ_k 、 σ_ϵ 分别为 k 、 ϵ 的紊流普朗特数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.2$; C_1 、 C_2 为常数, 分别取 $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.9$ 。

两相流采用 RNG k - ϵ 湍流模型, 其流体控制方程为^[24]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (7)$$

式中: G_b 表示由浮力产生的湍流动能; Y_M 表示可压缩湍流的过渡耗散对总体耗散率的贡献; μ_{eff} 为有效黏度; R_ϵ 为附加项; α_k 、 α_ϵ 分别为 k 、 ϵ 的反向有效普朗特数; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为常数, 分别取 $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$, $C_{3\epsilon} = 1.3$ 。

1.3.2 网格划分

采用 ANSYS ICEM CFD 18.0 对单相流模型进行非结构化网格划分. 计算域由内区域和外区域 2 部分组成. 内区域是包含搅拌桨的圆柱形区域, 直径 96 mm, 轴向高度 47.5 mm, 其余部分为外区域. 因内区域所处工况情况复杂, 故通过选取较小最大网格尺寸的方式, 对内区域网格进行局部加密处理, 最终确定 3 种网格数量不同的网格划分方案, 记录每一种方案在点(50, 60, 50)的速度和 RT 桨的扭矩值, 结果见表 1. 考虑计算效率和计算精度, 最终选择方案 2, 即网格数量为 3 563 798 的网格划分方案, 生成的网格见图 6a. 采用 ICEM CFD 对两相流模型进行非结构化网格划分. 计算域由内区域、外区域和上部区域 3 部分组成. 内区域同单相流模型, 上部区域是液面以上高 50 mm 的圆柱形空气区域, 其余部分为外区域. 为简化模型未考虑气体分布器引导管. 因内区域所处工况情况复杂, 且气体分布器总体尺寸较小, 故对它们采取网格局部加密处理, 同理得到 3 种网格划分方案, 记录每一种方案在点(50, 60, 50)的速度与 RT 桨扭矩值, 结果见表 1. 同样, 考虑计算效率和计算精度, 最终选择方案 2, 即网格数量为 2 370 916 的网格划分方案, 生成的网格见图 6b. 完成网格划分后, 在 Fluent 中将非结构化网格转换为多面体网格, 以提高计算效率和精度.

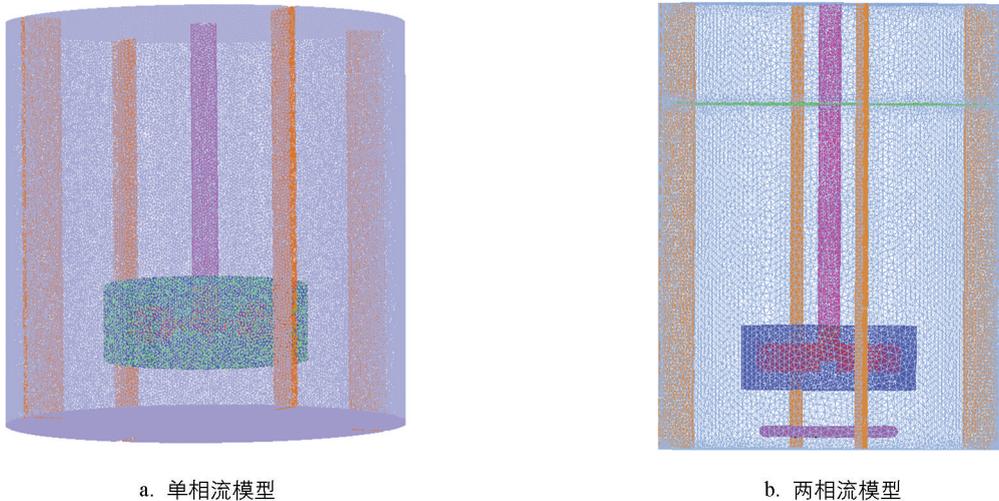


图 6 反应釜网格

表 1 网格独立性结果

流体类型	方案	网格数	记录点速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	RT 桨扭矩值/($\text{N} \cdot \text{m}$)
单相流	1	2 983 836	0.115 572	0.013 782
	2	3 563 798	0.113 108	0.013 353
	3	4 073 163	0.113 600	0.013 406
两相流	1	1 735 456	0.407 355	0.115 367
	2	2 370 916	0.421 987	0.116 655
	3	2 931 223	0.418 000	0.116 432

1.3.3 参数设置

单相流模型采用基于压力瞬态双精度求解器进行求解. 利用多重参考系法, 内区域和外区域通过 interface 面进行数据传递. 内区域和搅拌轴所在区域设置为 moving-zone, 转速设置为 120 r/min(与 PIV 实验一致), 其余区域设置为 stationary-zone. 顶部液面设置为 symmetry 类型. 采用基于压力的 SIMPLE 算法, 压力、动量、湍动能及湍动能耗散率方程离散均选择二阶迎风格式. 自由落体加速度 g 取 9.81 m/s^2 , 收敛残差为 1×10^{-4} .

两相流模型同样采用基于压力瞬态双精度求解器进行求解. 气液混合模拟采用欧拉多相流模型, 液相为主相, 气相为次相, 表面张力 $\sigma=0.073 \text{ N/m}$, 气泡直径设置为 4 mm . 采用 Grace 模型模拟相间曳力. 利用多重参考系法, 内、外区域和上部区域两两通过 interior 面进行数据传递. 内区域和搅拌轴设置为 moving-zone, 转速设置为 400 r/min , 其余区域设置为 stationary-zone. 气体分布器入口设为速度入口边界, 通气速率为 9.0 L/min , 顶部设置为压力出口边界, 压力速度耦合选用 Coupled 算法, 控制方程离散均选择一阶迎风格式. 初始化时, 上部区域设为气相且体积分数为 1, 收敛残差为 1×10^{-4} .

通过 CFD 仿真模拟可获得作用在搅拌桨和搅拌轴上的扭矩, 搅拌功率可计算为^[18]:

$$P = 2\pi NM \quad (8)$$

式中: P 为功率; M 为扭矩; N 为搅拌轴转速.

2 结果与分析

2.1 模型验证

2.1.1 单相流模型

对比 CFD 仿真模拟和 PIV 实验得到的搅拌桨桨叶末端附近位置轴向速度、径向速度, 以验证模型可靠性^[27]. 搅拌条件: 纯水, RT 桨, 转速 120 r/min . 在图 4 中 $c-c$ 平面内, $X=50 \text{ mm}$, $Z=0 \sim 120 \text{ mm}$ 线段上不同位置的轴向和径向速度经无因次化处理后^[14], 即轴、径向速度分别除以各自桨叶末端速度 $V_{tip} = \pi DN/60$, 分别表示为 U_z 和 U_r , 如图 7 所示, 其中反应釜坐标系示意图见图 5. 轴向速度、径向速度模拟值和实验值具有相同的变化趋势, 表明单相流模型可靠.

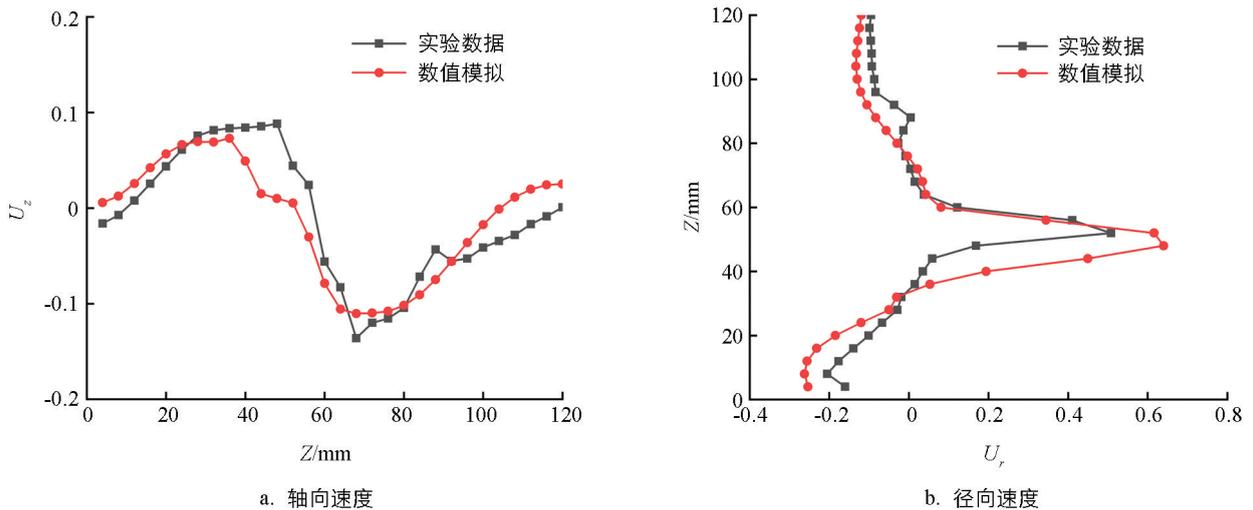


图7 不同位置的轴向速度和径向速度

2.1.2 两相流模型

以 0.25% CMC 溶液验证模型可靠性. 搅拌条件: RT 桨, 转速 400 r/min , 通气速率 9.0 L/min . 通过 CFD 模拟得到的总体气含率为 1.85% , 通过 PIV 实验得到的总体气含率为 1.98% , 模拟值与实验值高度吻合, 表明两相流模型可靠.

2.2 流体速度

对于纯水、 0.25% CMC 溶液、 0.5% CMC 溶液单相流体系, 通过 CFD 模拟得到 FT 桨、RT 桨搅拌时反应釜内全域速度矢量图和速度云图, 通过 PIV 实验得到 FT 桨、RT 桨搅拌时激光拍摄域的速度云图, 如图 8 所示.

由图 8a 可知, FT 桨、RT 桨在 3 种单相流体系中形成流型均为轴向对称流型, 在搅拌桨外侧, 形成上下 2 个主循环涡流, 与杨锋苓等^[28]观察到的流型一致. 随着 CMC 溶液质量分数增加, 液体表观黏度增加,

2 个主循环涡相应减小。

由图 8b 可知, FT 桨搅拌纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时的有效搅拌区域的 Z 轴坐标上限分别为 135.5 mm、113.0 mm、102.2 mm, 与 RT 桨对应的有效搅拌区域的 Z 轴坐标上限 128.5 mm、113.4 mm、102.0 mm 相比, FT 桨 Z 轴坐标上限总体上略大于 RT 桨, 故 FT 桨速度作用区域略大于 RT 桨, 有利于流体搅拌混合。随着 CMC 溶液质量分数增加, 液体表观黏度增加, 搅拌桨速度作用区域减少。对于搅拌 0.5% CMC 溶液, 在反应釜顶部区域形成面积较大且速度为 0 的区域, 即“死区”, 不利于流体搅拌混合。而顶部速度为 0 区域的流体可因重力加速度运动至搅拌桨作用区域。

由图 8c 可知, PIV 实验测得的 3 种单相流体流型与 CFD 模拟流型一致, 都在搅拌桨外侧形成了上下 2 个主循环涡流, 且这 2 个主循环涡流交界处位于搅拌桨安装位置, 流体高速流动区域都位于搅拌桨叶附近, 这进一步验证了 CFD 模拟的准确性。

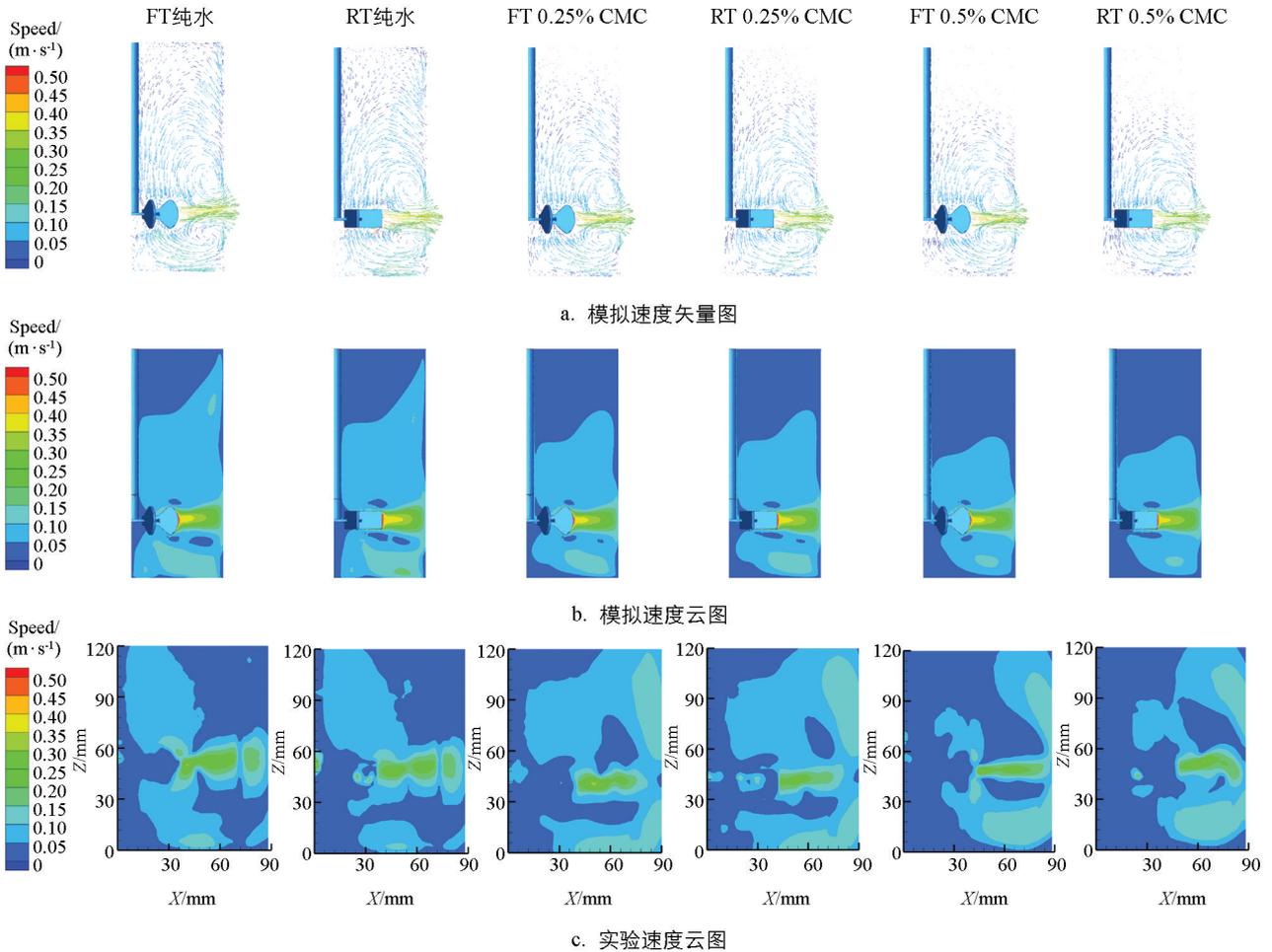


图 8 FT 桨和 RT 桨单相流速度矢量图和速度云图(搅拌速度 120 r/min)

在图 4 的 $c-c$ 平面内, 选取 $X=45$ mm、 $X=54$ mm、 $X=63$ mm、 $X=72$ mm 的 4 条直线, 分别提取直线上的轴向和径向速度, 经无因次化处理后, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 高径向速度作用区域位于搅拌桨安装高度位置, 高轴向速度作用区域沿高度(Z 向)与高径向速度作用区域错开, 是搅拌桨外侧 2 个主循环涡流的成因。随着溶液黏度的增加, 轴向、径向速度减小, 不利于溶液搅拌混合。因而, 对于高黏度溶液搅拌混合需采用较高的搅拌速度。

2.3 湍动能

根据公式(2)处理图 8c 中的速度实验数据, 得到 FT 桨、RT 桨分别搅拌纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时的湍动能图, 如图 10 所示。

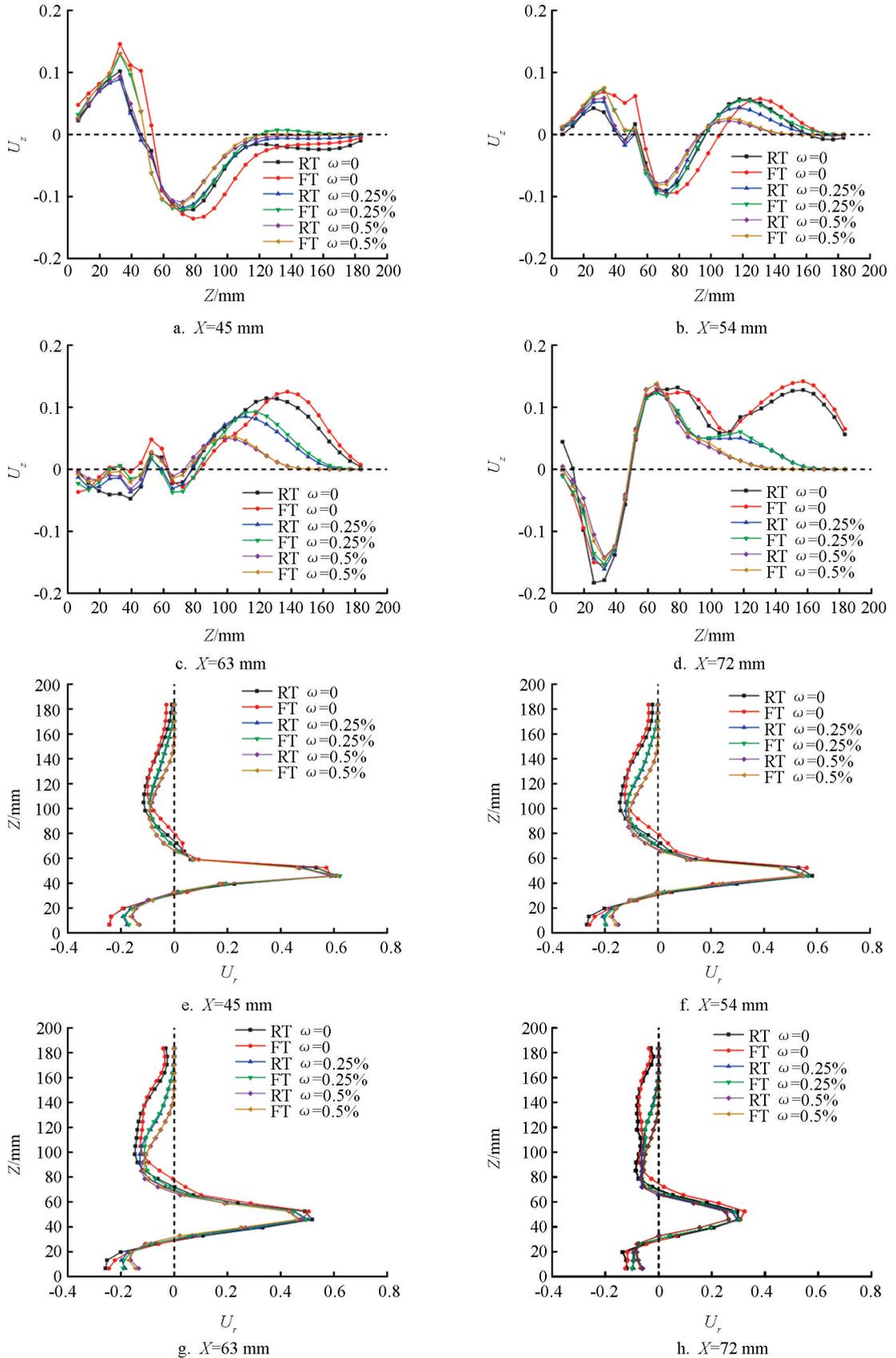


图 9 FT 桨和 RT 桨单相流轴向、径向速度(搅拌速度 120 r/min)

由图 10 可知, 在不同搅拌条件下, FT 桨、RT 桨搅拌得到的最大湍动能区域均出现在 $X = 50 \text{ mm}$, $Z = 50 \text{ mm}$ 附近, 2 个主循环涡流之间, 即最大湍动能区域与搅拌桨安装高度一致, 且位于

浆叶末端附近。FT 浆最大湍动能区域大于 RT 浆，FT 浆湍动能作用范围大于 RT 浆，反应釜内顶部流体流动性得到改善。

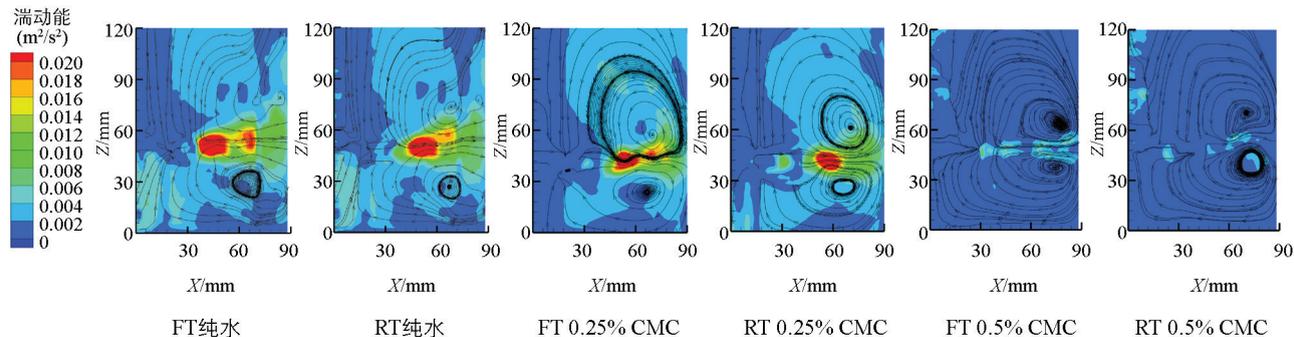


图 10 FT 浆和 RT 浆单相流湍动能图(搅拌速度 120 r/min)

FT 浆搅拌纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液得到的湍动能最大值分别为 $0.053 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.037 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.0084 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，与 RT 浆对应的湍动能最大值 $0.038 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.030 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.0071 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 相比，分别增加了 39.47%、23.33%、18.31%，平均增加 31.03%。因而，与 RT 浆相比，FT 浆可以明显提升流体湍动能。

此外，同等条件下，搅拌 0.5% CMC 溶液时的湍动能最大值很低，使搅拌混合效果变差。因而，对于高黏度流体搅拌混合应采用较高的搅拌速度。

2.4 搅拌功率

通过 CFD 模拟得到 FT 浆和 RT 浆不同工况下搅拌桨和搅拌轴上扭矩，再根据公式(8)计算得到搅拌功率，如表 2 所示。与 RT 浆相比，FT 浆 120 r/min 搅拌单相流纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时，搅拌功率分别降低 2.79%、1.80%、2.56%，平均降低 2.37%；FT 浆 400 r/min 搅拌两相流纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时，搅拌功率分别降低 4.58%、4.54%、4.98%，平均降低 4.70%。随着 CMC 浓度的增大，搅拌功率增大。FT 浆在高黏度、高搅拌速度条件下，降低功率的效果更明显。

但是，在 120 r/min 速度搅拌 0.5% CMC 溶液时，FT 浆和 RT 浆的搅拌功率均低于搅拌 0.25% CMC 溶液的搅拌功率。此时反应釜内流体顶部区域速度很低(图 8)，搅拌桨主要促进反应釜内底部区域流体流动，因而搅拌功率较低。

表 2 搅拌功率

浆类型	流体类型	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	搅拌功率/W		
			纯水	0.25% CMC 溶液	0.5% CMC 溶液
FT 浆	单相流	120	9.307	9.932	9.067
	两相流	400	266.043	273.657	280.986
RT 浆	单相流	120	9.574	10.113	9.306
	两相流	400	278.806	286.669	295.727

2.5 气含率

在搅拌转速 400 r/min、通气速率 9.0 L/min 的条件下，通过 CFD 模拟得到 FT 浆、RT 浆搅拌纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时的气含率分布图，如图 11 所示。

由图 11 可知，在不同搅拌条件下，在 FT 浆、RT 浆上部靠近挡板的位置形成高气含率区域。与 RT 浆相比，FT 浆形成的高气含率区域范围更大，而且 FT 浆对气液分散效果更好。

FT 浆搅拌纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时的总体气含率分别为 1.26%、2.02%、2.78%，与 RT 浆对应的总体气含率 1.16%、1.85%、2.71% 相比，分别相对增加了 8.62%、9.19%、

2.58%, 平均相对增加 5.94%。因而, 与 RT 桨相比, FT 桨可以提高搅拌体系的总体气含率。

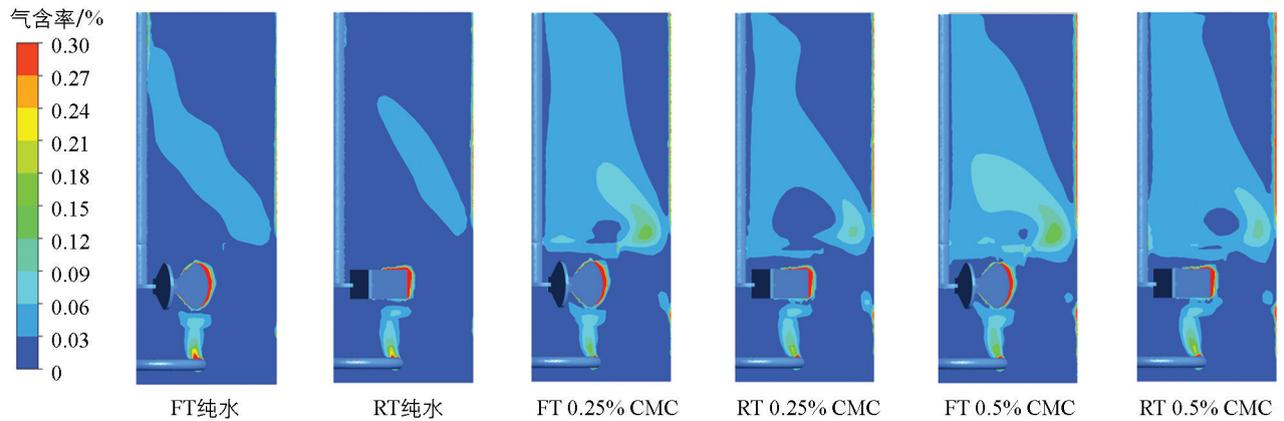


图 11 气含率分布图

3 结论

基于双色刺尻鱼尾鳍轮廓特征和仿生学原理设计了一种鱼尾型搅拌桨—FT 桨, 结合 CFD 和 PIV 技术, 研究了 FT 桨在纯水和 CMC 溶液中的搅拌混合和气液分散性能, 得到以下主要结论:

1) FT 桨可以显著提升流体湍动能。与 RT 桨相比, FT 桨以 120 r/min 搅拌纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时得到的湍动能最大值分别增加 39.47%、23.33%、18.31%, 平均增加 31.03%。

2) FT 桨可以明显降低搅拌功耗。与 RT 桨相比, FT 桨以 400 r/min 搅拌气液两相纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时的搅拌功耗分别降低 4.58%、4.54%、4.98%, 平均降低 4.70%。

3) FT 桨具有良好的气液分散性能。与 RT 桨相比, 在通气速率 9.0 L/min 的条件下, FT 桨以 400 r/min 搅拌气液两相纯水、0.25% CMC 溶液、0.5% CMC 溶液时的总体气含率分别相对增加 8.62%、9.19%、2.58%, 平均相对增加 5.94%。

参考文献:

- [1] 张秀玲, 张雪婷, 王峥鉴. 羧甲基纤维素复合涂膜对油豆角保鲜效果的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(8): 50-56.
- [2] 苏可珍, 唐月登, 王玉牛, 等. 响应面法优化软糯口感的粉圆制作配方 [J]. 南方农业学报, 2022, 53(2): 516-525.
- [3] 张玲. 全自动多功能食品搅拌机的设计 [J]. 工业设计, 2015(8): 185-186.
- [4] DING J, WANG X, ZHOU X F, et al. CFD Optimization of Continuous Stirred-Tank (CSTR) Reactor for Biohydrogen Production [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(18): 7005-7013.
- [5] 张红娟, 蔡正伟. 全自动食品搅拌机的开发及研究 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(1): 212-214.
- [6] 纪俊红, 江禹, 杜鸿贤, 等. 桨叶形状对 KR 法脱硫混合行为影响的数值模拟 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(5): 451-460.
- [7] 黎义斌, 梁开一, 歹晓晖, 等. 搅拌反应器气液两相流混合过程的涡旋效应数值模拟 [J]. 化工进展, 2021, 40(1): 99-110.
- [8] 许叶龙, 刘迎圆, 惠虎, 等. 固液混合过程的数值模拟及实验研究 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 675-680.
- [9] 路甬祥. 仿生学的意义与发展 [J]. 科学中国人, 2004(4): 22-24.
- [10] 刘明慧, 邹超, 肖杰, 等. 基于仿生学的柔性反应器 [J]. 化工学报, 2018, 69(1): 414-422.
- [11] 刘作华, 曾启琴, 杨鲜艳, 等. 刚柔组合搅拌桨与刚性桨调控流场结构的对比 [J]. 化工学报, 2014, 65(6): 2078-2084.
- [12] 刘作华, 陈超, 刘仁龙, 等. 刚柔组合搅拌桨强化搅拌槽中流体混沌混合 [J]. 化工学报, 2014, 65(1): 61-70.

- [13] 张志丰, 张峻霞, 张琰. 仿生设计方法在糖化搅拌桨设计中的应用 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 248-254.
- [14] 韩定强, 赵行, 武逸凡, 等. 基于 PIV 的仿生鲸尾型搅拌桨反应器流场研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2022, 47(2): 91-98.
- [15] GONZÁLEZ-NERIA I, ALONZO-GARCIA A, MARTÍNEZ-DELGADILLO S A, et al. PIV and Dynamic LES of the Turbulent Stream and Mixing Induced by a V-Grooved Blade Axial Agitator [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 374: 1138-1152.
- [16] ZHOU Y J, LIN W Z, YUAN M Y, et al. Investigation on the Flow Field and Mixing Efficiency of a Stirred Tank Equipped with Improved Intermig Impellers [J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2019, 17(11): 20190020.
- [17] 任璞, 龙威. 特斯拉阀流场特性及空化形成机理数值分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(8): 161-166.
- [18] 方玉建, 张敏, 孙先朋, 等. 机械搅拌槽内非牛顿流体内流特性研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 244-253.
- [19] 袁建平, 房洪芹, 孙先朋, 等. 四斜叶桨搅拌槽内部流场 PIV 试验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 48-54.
- [20] WANG S S, BU Q X, LUAN D Y, et al. Study on Gas-Liquid Flow Characteristics in Stirred Tank with Dual-Impeller Based on CFD-PBM Coupled Model [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2021, 38: 63-75.
- [21] 张翠勋, 曹明见, 杨锋苓. 双层格栅桨搅拌容器内气液两相混合 [J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(4): 71-76, 83.
- [22] 王福君, 王洪平, 高琪, 等. 鱼游动涡结构 PIV 实验研究 [J]. 实验流体力学, 2020, 34(5): 20-28.
- [23] 谷德银. 穿流刚柔桨搅拌反应器内流体混沌混合特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [24] SHU L, YANG M J, ZHAO H, et al. Process Optimization in a Stirred Tank Bioreactor Based on CFD-Taguchi Method: A Case Study [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 1074-1084.
- [25] CUNHA F M, ESPERANÇA M N, FLORENCIO C, et al. Three-Phasic Fermentation Systems for Enzyme Production with Sugarcane Bagasse in Stirred Tank Bioreactors: Effects of Operational Variables and Cultivation Method [J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 97: 32-39.
- [26] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows [J]. Computers and Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [27] SU T L, YANG F L, LI M T, et al. Characterization on the Hydrodynamics of a Covering-Plate Rushton Impeller [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26(6): 1392-1400.
- [28] 杨锋苓, 张翠勋, 苏腾龙. 柔性 Rushton 搅拌桨的功耗与流场特性研究 [J]. 化工学报, 2020, 71(2): 614-625.

责任编辑 汤振金

柳剑