doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.11.040

连续式咸淡水混合搅拌反应器混合性能研究

李　杰　陈滇豫　胡笑涛　何名淞

（西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西杨凌 712100）

摘要：为合理开发利用咸水资源，优化农田灌溉设施前端连续式咸淡水混合搅拌反应器结构和运行参数，探究了搅拌转速和桨叶宽度对不同类型搅拌器咸淡水混合性能的影响。以直径为 290 mm 的双层桨叶搅拌器为研究对象，采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和欧拉多相流模型进行数值模拟并利用试验结果对其进行验证。系统分析不同搅拌器结构在不同搅拌转速和桨叶宽度下的湍动能、速度流场、咸水体积分数分布、混合均匀所需时间及搅拌器功耗，发现随着搅拌转速和桨叶宽度增加，三叶开启式搅拌器与组合锚式搅拌器湍动能和液体流速均增加，反应釜内咸水体积分数也随之发生显著变化，到达混合均匀状态所需时间缩短，出口处咸水均匀度和搅拌器功率均呈上升趋势。整体来说，转速对上述指标的影响较桨叶宽度更为显著，另外，2 种搅拌器类型中相关指标受转速和桨叶宽度变化的影响差异明显。与三叶开启式搅拌器相比，组合锚式搅拌器达到完全混合均匀状态所需时间最小值虽然低 6.8%，但其搅拌功耗却高 10% 左右。综合考虑灌溉作物水量需求、混合效率和设备能耗等因素，推荐采用较低转速（90 r/min）、宽桨叶（50 mm）的三叶开启式搅拌器，该配置在咸淡水混合过程中能够有效保障混合效率，并在连续混合设备中有效控制能耗的同时满足实际应用需求。研究结果可为连续式咸淡水混合搅拌反应器设计优化提供参考。

关键词：咸水灌溉；连续式搅拌反应器；数值模拟；搅拌器；混合性能

中图分类号：S224.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)11-0417-12　　**OSID**：

Mixing Performance in Continuous Salt and Freshwater Mixing and Stirring Reactor

LI Jie　CHEN Dianyu　HU Xiaotao　HE Mingsong

(*Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to rationally develop and utilize brackish water resources, the structure and operating parameters of a continuous first-but-mix stirring reactor at the front end of an agricultural irrigation system were optimized. The effects of mixing speed and paddle width on the mixing performance were investigated by using a double-layer paddle mixer with a diameter of 290 mm. Realizable $k-\varepsilon$ model and Eulerian multiphase flow model were used for numerical simulations and validated by experimental data. The analysis of turbulent kinetic energy, velocity flow field, brackish water volume fraction distribution, mixing time and power consumption of the agitator showed that the increase in mixing speed and paddle enhanced the turbulence and flow velocity for both the three-bladed open type and the combined anchor type. It was found that the rotational speed had a greater effect on the studied parameters than the paddle width. Overall, the effect of rotational speed on the studied parameter was significantly more than paddle width, in addition to the significant difference in the effect of these two factors on the two types of agitators. Compared with the three-bladed open agitator, the combined anchor agitator reduced the agitation time by 6.8%, but increased the agitation power consumption by about 10%. Taking into account of crop irrigation requirements, mixing efficiency and equipment energy consumption, it was recommended to use a three-blade open agitator with a lower speed (90 r/min) and a wide paddle (50 mm). This configuration can effectively balance the mixing efficiency and energy consumption of a

收稿日期：2024-06-19　修回日期：2024-08-16

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD1900502)

作者简介：李杰(2001—)，男，硕士生，主要从事咸水资源化技术与系统研究，E-mail：000926lijie@nwafu.edu.cn

通信作者：胡笑涛(1972—)，男，教授，主要从事节水灌溉原理与新技术研究，E-mail：huxiaotao11@nwafu.edu.cn

continuous salt and freshwater mixing and stirring system. The results can provide a reference for the design optimization of continuous brackish freshwater mixing and stirring reactors.

Key words: brackish water irrigation; continuous stirring reactor; numerical simulation; stirrer; mixing performance

0 引言

我国北方地区,尤其是新疆内陆河流域,浅层地下咸水储量大,合理开发利用咸水资源,通过咸淡水掺混进行灌溉,有利于解决农业水资源供需矛盾,对干旱区发展尤为重要。在咸淡水掺混过程中,采用搅拌器搅拌掺混可以加速咸水和淡水的充分混合,提高混合水均匀程度,减小进入田间前端的灌溉设施规模。

为提高搅拌设备性能,国内外学者围绕增强设备内的流体混合效果及降低设备能耗等方面开展了大量研究[1]。搅拌器作为混合反应过程中的关键设备,其桨叶形态和结构是影响搅拌设备内部流场特征及传质效率的重要因素[2-4]。鉴于试验条件下难以对反应器内部流场进行精细和充分的量化,借助计算机技术,结合室内试验和数值模拟等手段,基于流场特性对搅拌装置的结构参数和运行工况进行优化的研究表现出较强优势[5-7]。作为一种经典的数值模拟方法,计算流体力学(Computational fluid dynamics,CFD)可用于研究流体运动和传质、传热规律,在两相流混合预测[8-9]、搅拌器流场模拟和功耗计算[10]等方面得到了广泛应用。

目前 CFD 技术主要用于搅拌设备结构形式、尺寸及重要部件安装位置等参数的优化设计[11]。例如,李芦雨[12]研究了固液两相流混合过程中不同桨叶形式、叶片数量、叶片倾角、搅拌器离底高度及叶片间距等因素对混合效果的影响,并根据模拟结果确定了最优参数组合方案。类似地,周勇军等[13]通过数值模拟与粒子图像测速(Particle image velocimetry,PIV)验证相结合的方式对改进型框式组合桨搅拌釜内的流场进行研究,分析了不同搅拌转速、离底高度及搅拌桨叶安装角等条件对流场的影响,并得出桨叶安装角为 90°、离底间距 100 mm(反应釜直径的 25%)、层间距 330 mm(反应釜直径的 75%)具有最佳混合效果。

当前相关国内外研究大多针对间歇式搅拌反应器,而连续式搅拌反应器(Continuous stirred tank reactor,CSTR)内流场和搅拌器混合性能的研究明显不足[14]。在连续式搅拌反应器中,混合过程在流体进入反应器时便开始发生,在连续化工艺和搅拌器助力下,混合过程连续性较好,能够克服间歇式搅拌反应器混合效率较低等弊端,具有很高的实际应用价值[15]。连续式搅拌反应器相较于间歇式搅拌反应器,其内的流场特性和混合性能更为复杂。CSTR 混合性能可以通过停留时间分布(Residence time distribution,RTD)分析来解析[16],获取各相在反应釜中的停留时间数据,联合系统内混合程度的定量测量结果,能为非理想反应器设计提供关键信息[17]。RAJAVATHSAVAI 等[18]系统研究了搅拌桨转速、液体黏度及反应釜中雷诺数对 CSTR 中液体停留时间分布的影响,采用 KCl(氯化钾)溶液示踪方法结合反应釜出口 KCl 浓度随着时间变化结果,对无搅拌桨的 CSTR 液体停留时间分布进行了数值模拟研究,成功量化了 CSTR 反应器内液体的混合行为。

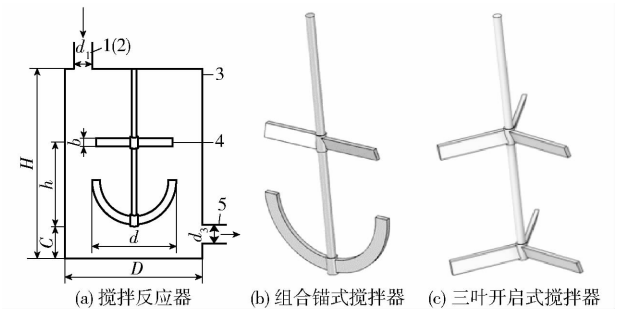
鉴于连续式搅拌反应器中液体的混合效果及反应釜混合性能的研究缺乏,而实际生产对连续式搅拌反应器需求较大的问题,本研究以连续式咸淡水混合搅拌反应器为研究对象,以数值模拟与实测相结合的研究方法,通过探究咸淡水混合搅拌反应器内的湍动能、速度流场和咸水体积分数分布特征,权衡出水端咸淡水混合均匀度、达到完全混合均匀时间(混合性能)和搅拌器功率(能耗),进行不同搅拌桨类型、桨叶宽度及搅拌转速等参数比选,以期为优化咸淡水混合灌溉装置提供参考,促进咸水资源化安全高效利用。

1 材料与方法

1.1 连续式反应器结构与运行工况设置

为方便数值计算,采用简化的连续搅拌反应釜模型,由 1 个反应釜和 1 个双层搅拌器构成(图 1a),反应釜直径 D 为 580 mm,高度 H 为 760 mm。搅拌器选取轴向流类型的组合锚式搅拌器(图 1b)和径向流类型的三叶开启式搅拌器(图 1c),搅拌器桨叶直径 d 为 290 mm,下层桨叶与反应釜底部距离 C 为 160 mm,上下层桨叶间距 h 为 300 mm。顶部咸水进水口直径 d_1 与淡水进水口直径 d_2 均为 40 mm,咸淡水进水口位于距顶部中心 250 mm 处,对称分布于轴线两侧,底部混合水出水口直径 d_3 为 40 mm,出水口距反应釜底部 100 mm。

根据搅拌器设计标准[19],对 2 种类型搅拌器设



(a) 搅拌反应器　(b) 组合锚式搅拌器　(c) 三叶开启式搅拌器

图 1　搅拌器和反应器结构示意图

Fig. 1　Schematics of stirrer and reactor

1. 咸水进口　2. 淡水进口　3. 反应釜　4. 搅拌器　5. 混合水出口

计了 3 个不同桨叶宽度：30、40、50 mm。对于每种搅拌器桨叶宽度分别设置 4 个梯度转速：60、90、120、150 r/min。各类搅拌器数值模拟工况如表 1 所示。通过对比 2 种类型搅拌器桨叶尺寸和转速对咸淡水混合效果的影响，并权衡功耗进行咸淡水混合装置结构优化及运行参数优选。

表 1　不同类型搅拌器数值模拟工况

Tab. 1　Summary of numerical simulation conditions for different types of agitators

工况	搅拌器直径 d/mm	桨叶宽度 b/mm	搅拌转速 n/(r·min^{-1})
1	290	30	60
2	290	30	90
3	290	30	120
4	290	30	150
5	290	40	60
6	290	40	90
7	290	40	120
8	290	40	150
9	290	50	60
10	290	50	90
11	290	50	120
12	290	50	150

搅拌功率通过提取 CFD 数值模拟中搅拌桨叶和搅拌轴上的搅拌力矩进行计算，计算公式[20-21]为

$$P=\frac{2\pi nM}{60} \tag{1}$$

式中　P——搅拌功率，W

M——搅拌器力矩，N·m

试验混合均匀度通过测量出口混合水水质指标（电导率（mS/cm）、离子质量浓度（mg/L）），与进水口处咸水和淡水各自水质指标及咸淡水进水比例进行计算，混合均匀度计算公式为

$$S=\frac{5C_3}{C_1+4C_2}\times 100\% \tag{2}$$

式中　S——混合均匀度，%

C_1——咸水进水口水质指标

C_2——淡水进水口水质指标

C_3——反应器出水口混合水水质指标

其中水质指标（电导率、Na^+ 离子浓度、Cl^- 离子浓度）三者中任选其中一种进行计算。

数值模拟混合均匀度根据反应器出口处咸水体积分数进行计算，其均匀度计算公式为

$$S=\frac{\varphi_1}{\varphi_2}\times 100\% \tag{3}$$

式中　φ_1——出口处咸水体积分数，%

φ_2——出口处咸水达到混合均匀时的体积分数，取 20%

1.2　数值模拟

1.2.1　边界条件

本研究的搅拌介质为由咸水和淡水所组成的咸淡水混合系统，其中咸水密度为 1 008.2 kg/m^3，液体黏度为 1.111 ×10^{-3} Pa·s；淡水密度为 998.2 kg/m^3，液体黏度为 1.003 ×10^{-3} Pa·s，咸水和淡水两相进水体积比为 1∶4。湍流模型选用欧拉两相流模型，该模型能够更全面、更详尽、更精确地进行流场计算[22]。在模拟搅拌桨旋转过程中，采用多重参考系模型（MRF），反应器划分为旋转域和静止域[23]。其中旋转域包括上下搅拌器桨叶、搅拌轴和桨叶周围局部流体，旋转轴为 Z 轴，搅拌转速恒定；静止域则涵盖反应器壁面、咸淡水进水口和出水口等搅拌反应器内其余区域，旋转域与静止域之间采用交界面（interface）进行数据交换。反应器两个进水口（inlet）均设定为速度进口，出口（outlet）设定为压力出口，反应器顶部设置为对称边界条件（symmetry），由于搅拌轴与旋转域的旋转速度相同，将其设置为旋转无滑移壁面，其余近壁面均设置为标准壁面函数。边界条件设置如图 2 所示。

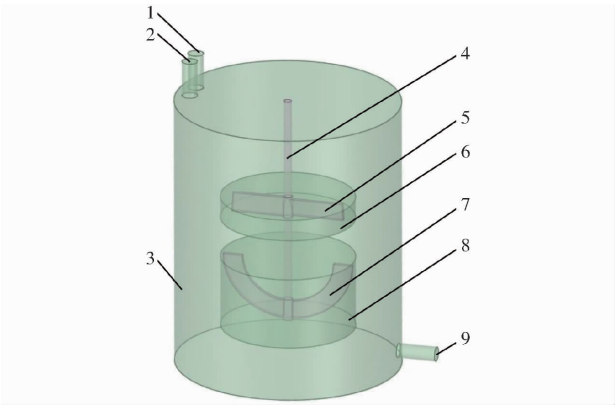


图 2　计算域边界条件设置

Fig. 2　Boundary condition settings for computational domain

1. 咸水进水口　2. 淡水进水口　3. 无滑移壁面　4. 搅拌轴　5. 上层搅拌桨叶　6. 上层旋转域　7. 下层搅拌桨叶　8. 下层旋转域　9. 压力出口

1.2.2 模拟设置与网格生成

在搅拌器湍流计算过程中,最常采用 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型,其中 Realizable $k-\varepsilon$ 模型在模拟过程中考虑旋转和曲率等相关因素,并将这些因素与应变率进行整合[24]。该模型在处理旋转剪切流、射流、强剪切流等自由流动、边界层流和分离流的问题上表现出显著优越性[25]。鉴于本研究涉及旋转剪切和射流等复杂过程,故采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型进行数值计算。流体动力学方程选用 Navier-Stokes,时间序列选用瞬态,考虑重力影响,设置重力方向为 Z 方向,加速度为 9.81 m/s^2,同时压力与速度耦合采用 Phase Coupled SIMPLE 算法,压力项采用 PRESTO 差分格式,动量、湍动能和湍流耗散率离散格式采用二阶迎风格式,除体积分数设置为 20% 其余松弛因子保持不变,空间离散梯度方程采用 Least Squares Cell-Based。为了确保模拟结果的准确性,计算过程中需密切关注连续性残差等关键变量的变化,以防止出现伪收敛现象[26]。为了进一步确保模拟稳定性和结果可靠性,将残差收敛标准设定为 1×10^{-6},其余方程均设定为 1×10^{-4},并设置计算时间步长为 0.02 s,时间步数设置为 35 000。同时在反应器内搅拌器和反应器出口创建 2 个监测面,用于监测搅拌器扭矩及反应器出口咸水体积分数。

采用 SpaceClaim 软件进行连续式反应器几何建模和前处理,随后采用 Fluent Meshing 进行网格划分。考虑到非结构化网格在处理复杂几何形状,特别是弯曲曲面时的适用性,选取 poly-hexcore 网格划分方法。该方法在减少整体网格数量、降低计算成本的同时,还保证网格具有较高的几何精度,这对于捕捉流动细节至关重要[27]。为了更精确地模拟旋转域内的流动特性,在网格划分阶段对旋转域实施了网格加密。

在数值模拟过程中,网格划分方法和网格数量对数值模拟结果具有极大影响[28-29]。采用合理的网格及网格数量,能在保证模拟精度的前提下尽可能地减少计算工作量[30-31]。本研究以搅拌器直径为 290 mm、桨叶宽度为 30 mm 的三叶开启式搅拌器在 90 r/min 工况下的搅拌桨叶扭矩作为网格无关性的衡量指标[32],并与扭矩传感器测得扭矩进行对比。随着网格数量的不断增加,搅拌桨叶扭矩下降并趋于稳定,图 3 分析了 6 种网格方案对搅拌器叶片扭矩的影响,与实际试验测得的搅拌器扭矩(1.08 N·m)相比,随网格数量增加(2×10^5、2.5×10^5、3×10^5、4×10^5、6×10^5、9.6×10^5、1.2×10^6)与实际测量值偏差逐渐减小但减小幅度逐渐变慢(偏差分别为 6.15%、2.81%、0.68%、0.50%、0.35%、0.26%、0.17%)。当网格数量达到 3×10^5 时,与实际测量值相差较小的同时,其网格数量较小且后续随网格数量再增加,偏差减小幅度大大降低,考虑数值模拟精度和计算工作量,最终选取 297 389 的网格划分方案进行不同条件下的数值模拟计算,其网格划分情况如图 4 所示。

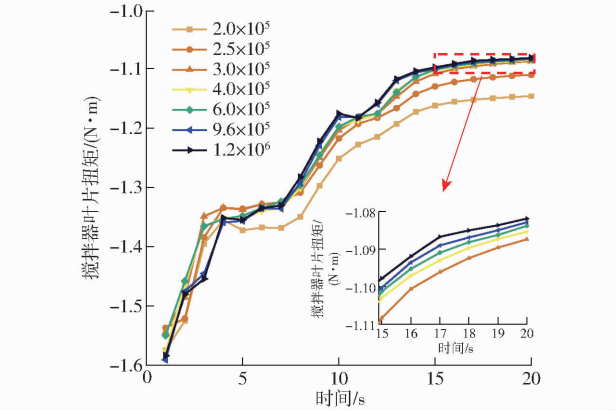
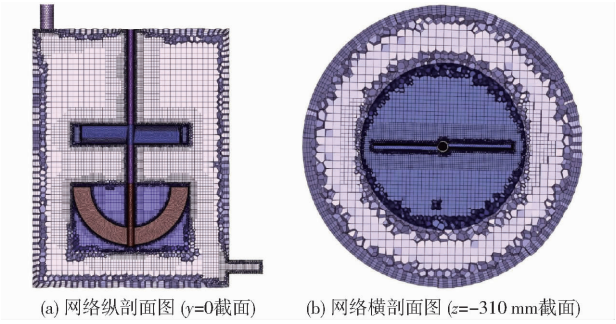


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Verification of mesh-independence



(a) 网络纵剖面图 (y=0截面) (b) 网络横剖面图 (z=-310 mm截面)

图 4 最终计算网格生成图

Fig. 4 Final computational mesh generation diagram

1.2.3 数值计算结果验证

为验证数值模拟的准确性,于西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院搭建试验台(图 5)进行试验验证。连续式搅拌反应器为圆柱形水罐且内部为无挡板结构,其结构及运行相关设置均与数值模拟条件相同。系统主要组件包括搅拌电机、咸淡水储水装置、咸水进水变频泵、淡水进水变频泵、咸水电动阀、淡水电动阀、电磁流量计、咸淡水混合装置、搅拌器以及搅拌变频器等。储水装置为混合装置提供稳定的咸淡水来源,变频泵和电动阀协同工作调控咸淡水进水比例,搅拌器在搅拌电机带动下驱动搅拌桨叶转动。搅拌器转动速度由搅拌变频器来控制,搅拌轴上可以安装不同结构的搅拌桨叶。并在出口处进行水样监测,分别记录不同时刻的电导率、Na^+ 浓度和 Cl^- 浓度用以计算混合均匀度。

图 6 为桨叶直径 240 mm、桨叶宽度 30 mm 的组合锚式搅拌器连续式搅拌釜在不同转速条件下出口

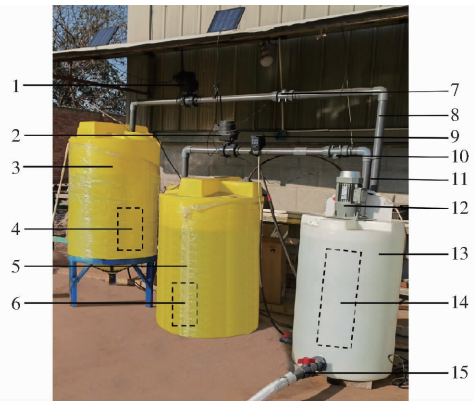


图 5　连续式咸淡水混合搅拌反应器试验台

Fig. 5　Continuous salt and fresh water mixing and stirring reactor test bench

1. 咸水电动阀　2. 淡水电动阀　3. 咸水储水装置　4. 咸水进水变频泵　5. 淡水储水装置　6. 淡水进水变频泵　7. 咸水电磁流量计　8. 咸水进水管道　9. 搅拌变频器　10. 淡水电磁流量计　11. 淡水进水管道　12. 咸淡水搅拌电机　13. 咸淡水混合装置　14. 咸淡水搅拌器　15. 出水管道

均匀度的数值模拟与试验结果对比图。由图 6 可以看出，数值模拟结果与试验结果变化趋势一致，同时二者线性拟合方程决定系数 R^2 均大于 0.996，且最大相对误差不超过 5%，说明数值模拟结果与实际结果相符，可靠性高。

2　结果与分析

2.1　桨叶宽度和转速对流场的影响

2.1.1　湍动能

湍动能增加表示反应器内部流场能量传递增强，物质交换过程加剧，混合效果提升。当反应器内部流场趋于稳定时，湍动能数值及其分布情况基本不再随时间变化，选择数值计算末端时间点（700 s）进行分析。

图 7 为时间 t = 700 s 时组合锚式搅拌器和三叶开启式搅拌器不同桨叶宽度下，上层搅拌桨叶中心所在平面湍动能随转速变化特征。由图 7 可以看出，湍动能较高区域主要位于近桨叶外侧区域，而湍动能较低区域则集中在近反应釜内壁区域及搅拌轴周围。在相同桨叶宽度下，随着搅拌转速增加，一方面远离桨叶区域湍动能较低的范围不断减小，另一方面靠近桨叶外侧的区域湍动能随之增大。在相同转速下，随着搅拌桨叶宽度增加，远离桨叶区域湍动程度较小的面积也呈减小趋势，且靠近桨叶外侧区域湍动能也有所增大。组合锚式搅拌器当转速由 60 r/min 增加至 90 r/min 时，其湍动能变化剧烈，反应釜内湍流效果变化明显；相同转速及桨叶宽度条件下，相比组合锚式搅拌器，三叶开启式搅拌器引起的湍动能更高，带动范围更广，且搅拌转速和桨叶宽度增加对湍动能的加强效果也更明显。

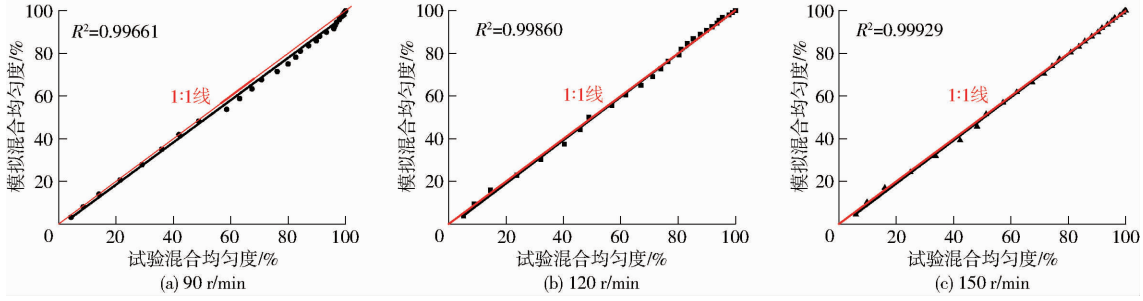


图 6　数值模拟结果与实测结果对比

Fig. 6　Comparisons between numerical simulation results and measured results

2.1.2　速度流场

尽管湍动能分布和变化趋势对流体宏观特性有明显的影响，为了更加有效地对内部流场信息进行验证。本研究对速度流场变化进行了研究，以更加全面地反映装置内部流体的变化规律[33]。同样选择反映内部流场趋于稳定的数值计算末端时间点（700 s）进行分析。

图 8 为 t = 700 s 时组合锚式搅拌器和三叶开启式搅拌器不同桨叶宽度和转速条件下搅拌轴中心平面速度流场分布特征。由图 8 可以看出，较低流速区集中在搅拌器附近及其正下方，而较高流速区则分布在两层搅拌桨叶端附近。对于所研究的两类搅拌器，流线并未因桨叶宽度和转速变化而发生显著改变。在相同桨叶宽度下，随着搅拌转速增加，流场中液体混合速度增加，流速也随之增加；同时较高流速区由搅拌桨叶向反应釜内壁扩展，较低流速区范围随之减小。三叶开启式搅拌器在转速由 120 r/min 增加到 150 r/min 后，低速区范围减小趋势明显减弱，尤其在桨叶宽度较大条件下。转速一致时，随搅拌桨叶宽度增加，流场中液体混合速度增加，较高流速区域范围增加，较低流速区域范围减小，反应釜内流速分布更加均匀。相较于组合锚式搅拌器，三叶开启式搅拌器流速死区更小。

2.2　桨叶宽度和转速对咸淡水混合性能的影响

2.2.1　咸水体积分数

在咸淡水连续式搅拌反应器中，咸水、淡水分别通过反应釜顶部边缘的进水口按照比例均匀且持续

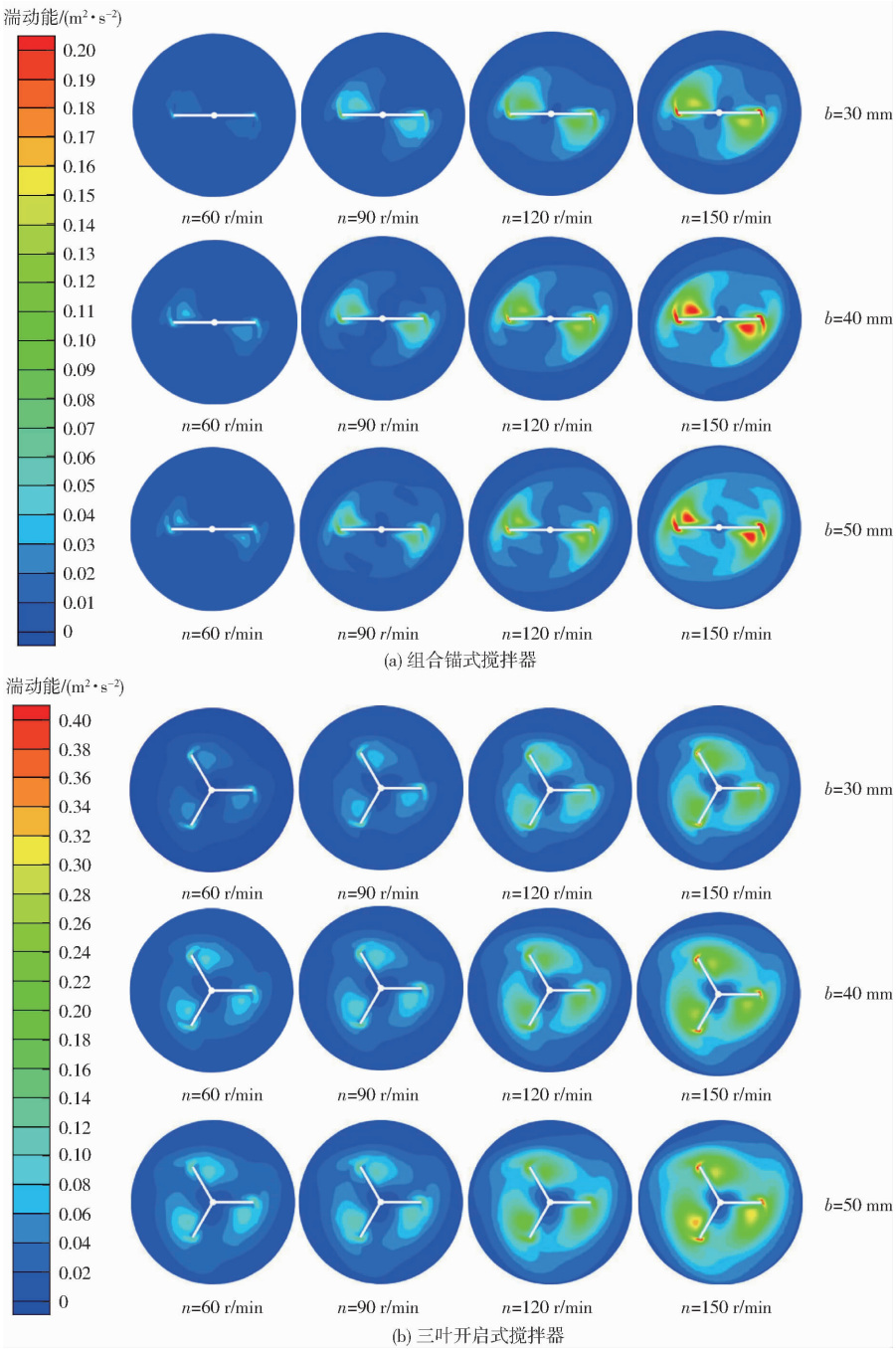


图 7 $t=700$ s 时不同桨叶宽度下湍动能随转速变化云图

Fig. 7 Variations of turbulent kinetic energy with rotational speed with different stirring paddle widths at $t=700$ s

地进入反应釜内,经过混合的水体通过反应釜底部的出水口排出,咸水、淡水的总进水量与混合水的出水量保持一致。如果反应釜内的搅拌混合效率较高,咸水、淡水加入反应釜后在搅拌器作用下进行混合,使其在到达出水口前已经达到均匀混合的状态。

随着咸淡水混合反应的不断进行,反应釜内部的咸水浓度分布情况也不断发生变化,当其出口处混合水体均匀度达到完全均匀状态后,内部流场变得稳定,在数值计算末端时间点咸水分布基本已稳定,无法进行不同工况下咸水体积分数差异对比。故本研究选取反应时间为 100 s,此时体积分数主要集中在 10% ~16% 范围内且内部分层效果显著,各工况混合均匀度皆未稳定,便于对各处理之间的差异进行分析。

图 9 为 $t=100$ s 时组合锚式搅拌器和三叶开启式搅拌器不同桨叶宽度下搅拌轴中心平面咸水体积分数随转速变化情况。由图 9 可以看出,咸水由上部进水口进入反应釜后浓度不断降低,在搅拌器作用下浓度呈锥型沿着搅拌器向反应釜内壁从高到低逐渐变化。在相同桨叶宽度下,随搅拌转速增加,顶部高浓度向下扩散的作用加强,位于搅拌器下方的低浓度区域随之减小,因此反应釜内的体积分数差

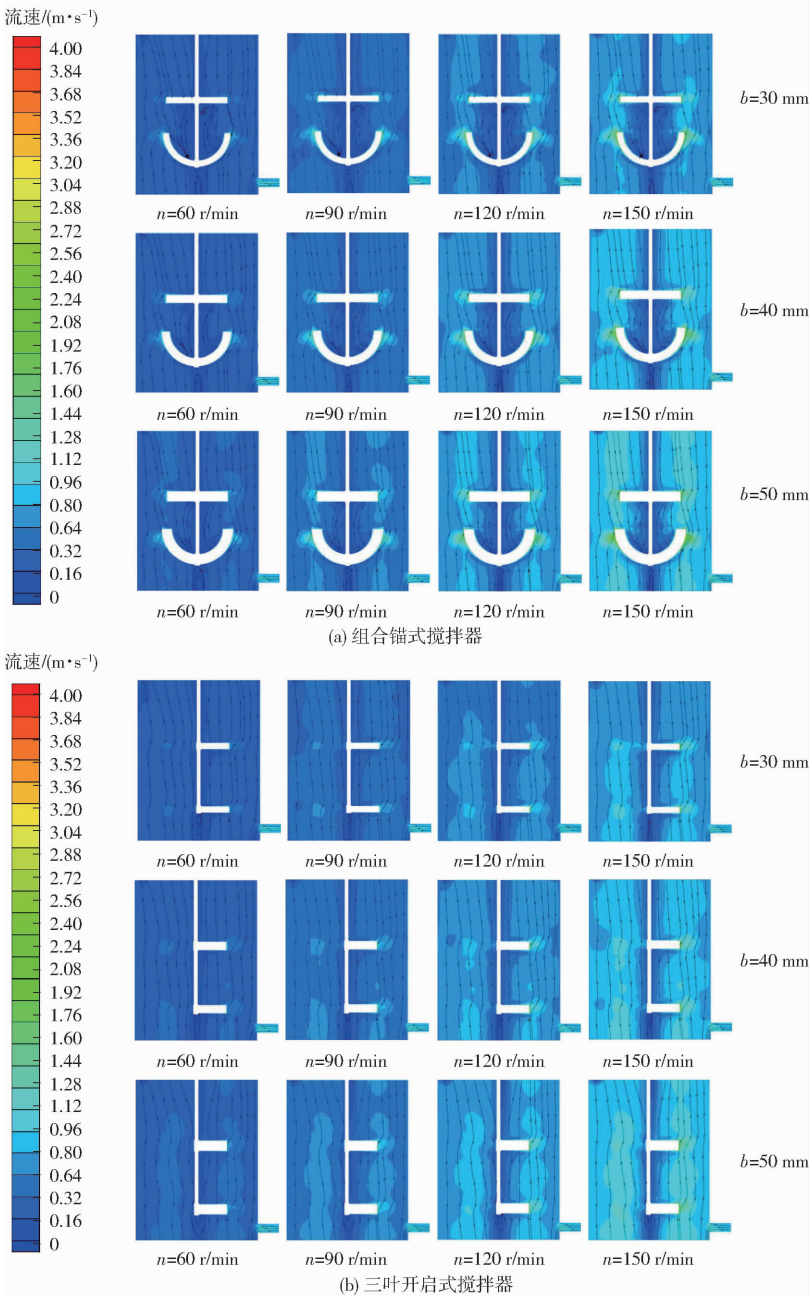


图 8　t = 700 s 时不同桨叶宽度下速度流场随转速变化云图

Fig. 8　Velocity flow field variations with rotational speed with different stirring paddle widths at t = 700 s

异减小，分布更加均匀。这也说明转速增加，反应釜内部流场能量传递增加，湍流加剧，物质交换更加剧烈，混合效果增强。在相同转速下，随着搅拌桨叶宽度增加，靠近搅拌器的锥型高浓度区域逐渐减小，但当桨叶宽度由 40 mm 增加到 50 mm 后，位于搅拌器正下方的低浓度区域再无明显变化。通过对比可知，搅拌转速对纵向平面咸水体积分数的影响相较于桨叶宽度影响更大，且三叶开启式搅拌器桨叶宽度增加仅使反应釜上部区域咸水体积分数分布更加均匀，对反应釜下层的低浓度区域则无显著影响。

2.2.2　出口处混合水均匀度

咸水和淡水从反应器顶部进入时都具备一定的初始速度，进入搅拌器产生的旋转区域与反应釜内原有的淡水发生扩散和混合。咸水在经过搅拌器产生的旋涡流影响后，由反应器顶部流动到底部，同时从搅拌轴附近向反应器内壁扩散。随着时间推移，反应器内各层以及沿着搅拌轴方向咸水浓度差异逐渐降低，连续式搅拌反应器出口处的混合水盐分浓度逐步逼近到混合均匀状态对应的数值（由咸水与淡水进水比例计算获得）。反应器出口的混合水盐分浓度到达混合均匀状态下的稳定浓度（均匀度为 95%）所经过的时间为混合均匀时间，其为衡量混合性能的重要评价参数[34]。

图 10 为连续式搅拌反应器出口咸水均匀度随时间变化情况，总体上来看，同一类型搅拌器出口咸水均匀度随时间推进的趋势在不同桨叶宽度和不同

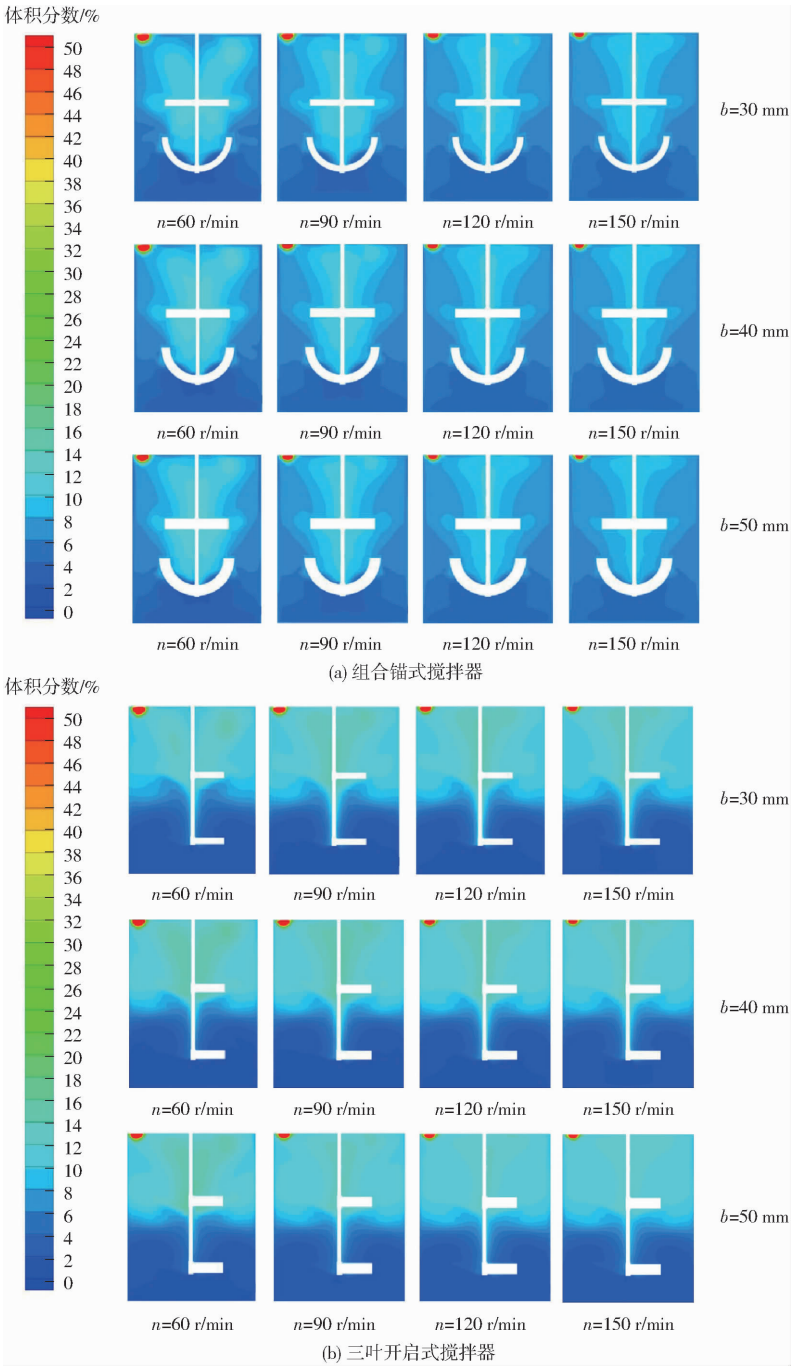


图 9 t = 100 s 时不同搅拌桨叶宽度下咸水体积分数随转速变化云图

Fig. 9 Salty water volume fraction variations with rotational speed with different stirring paddle widths at t = 100 s

转速条件下较为相似。在相同搅拌转速条件下,随桨叶宽度增加,出口到达均匀状态所需时间减少。其中,三叶开启式搅拌器桨叶宽度由 40 mm 增大至 50 mm 对混合均匀效率的提高效果最显著。相同桨叶宽度条件下,随着搅拌转速增加,混合均匀所需时间也随之减少,但减少幅度逐渐变小。相比而言,搅拌转速对混合均匀所需时间的影响程度大于桨叶宽度。搅拌转速对三叶开启式搅拌器混合均匀所需时间的影响强于组合锚式搅拌器,但桨叶宽度的影响弱于组合锚式搅拌器。

图 11 为连续式搅拌反应器在不同桨叶宽度下到达混合均匀所需时间随搅拌转速变化情况。由图 11 可以看出,随着搅拌转速和桨叶宽度增加,2 种搅拌器到达完全混合均匀所需时间缩短,因为转速和桨叶宽度的增加增强了反应器内的湍流效果,促进了反应釜内上、下部分的液体流动,加快了咸淡水混合进程。当转速由 60 r/min 增加为 90 r/min 时,混合均匀所需时间减小程度较大,随着转速继续增加,搅拌转速对混合均匀所需时间的影响趋于稳定。其中 150 r/min、50 mm 时组合锚式搅拌器混合均匀时间最短(493.13 s),但较三叶开启式搅拌器的最短混合均匀所需时间(529.22 s)仅缩短 6.8%,

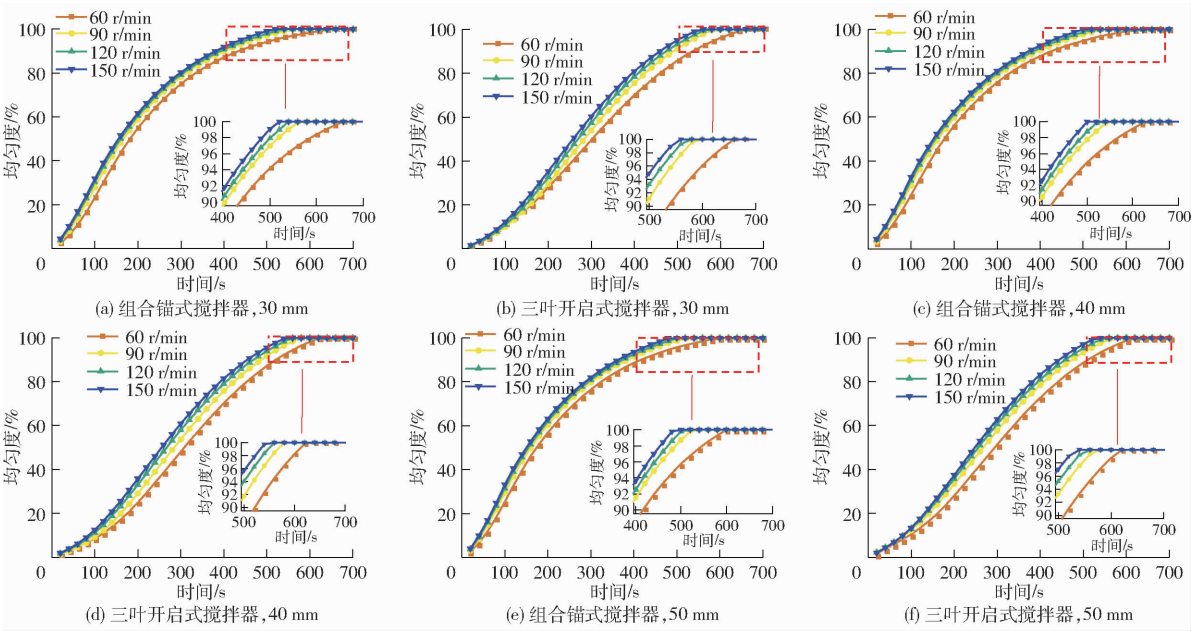


图 10　连续式搅拌反应器出口咸水均匀度随时间变化曲线

Fig. 10　Variation curves of salty water at outlet of continuous stirred reactor over time

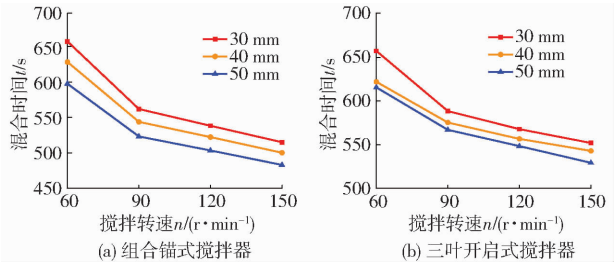


图 11　不同桨叶宽度下完全混合均匀所需时间随转速变化曲线

Fig. 11　Variation curves of time required for complete mixing uniformity with rotational speed under different paddle widths

该工况下 2 种类型搅拌器到达完全混合均匀时间的差异最大。

通过出口均匀度变化趋势可以看出，组合锚式搅拌器在混合前期连续式搅拌反应器出口咸水均匀度变化剧烈，但当出口均匀度到达基本混合均匀（出口咸水混合均匀度等于 90%）时，其均匀度变化逐渐趋于平缓，且基本混合均匀所需时间、完全混合均匀所需时间比为 20∶27，即混合反应主要集中在前 75% 的时间内。主要是因为组合锚式搅拌器是轴向搅拌器，其在搅拌过程中会将反应釜底部液体进行上翻与上部液体进行混合，使液体在反应釜内产生循环流。因此在上部咸水进水时间较短时可以快速提高反应器内的咸水浓度和混合均匀度，但随着反应釜内的咸水浓度不断升高，咸水均匀度提升变得逐渐平缓。三叶开启式搅拌器在连续式搅拌反应器整个混合阶段中出口咸水均匀度变化较为平稳，当出口均匀度到达基本混合均匀时，其均匀度变化仍然较为剧烈，其基本混合均匀时间、完全混合均匀时间比为 24∶27，即在整个混合过程中均处于较高反应状态。主要是因为三叶开启式搅拌器是径向搅拌器，其在搅拌过程中将动力传递给液体，使其在搅拌桨叶上部和下部分别产生涡流循环区，形成径向流状态，随着出口不断排出液体，上层均匀液体不断向出口靠近，当出水口流速较快时能够很好地进行咸淡水混合。因此组合锚式搅拌器较三叶开启式搅拌器更适用于间歇式搅拌反应器及停留时间较长、进出水量较小的连续式搅拌反应器，而后者对于停留时间较短、进出水量较大的连续式咸淡水混合搅拌过程具有更好的效果。

2.3　搅拌功率特性

功耗是衡量连续式搅拌反应器性能的一项关键指标[35]，更高的功率可以增强反应釜内部流场的能量传递和物质交换，提高混合效果。当混合效果接近的情况下，较低的功耗意味着更节能[36]，有利于降低使用成本，在确保灌溉水质的前提下实现更经济的生产。因此，功耗也是连续式咸淡水混合系统需要关注的重要参数。

图 12 为搅拌器功率 P 与转速 n 之间的关系。由图 12 可以看出，搅拌功率随着搅拌转速和桨叶宽度的增大而增大，且两种桨叶类型功率-转速变化曲线趋势接近，但组合锚式搅拌器增长幅度高于三叶开启式搅拌器。三叶开启式搅拌器功耗低于相同转速下的组合锚式搅拌器，二者的差异随转速增加而增加。桨叶宽度一致情况下，随转速增加，搅拌功率增加速度变大，且这种特征组合锚式搅拌器比三叶

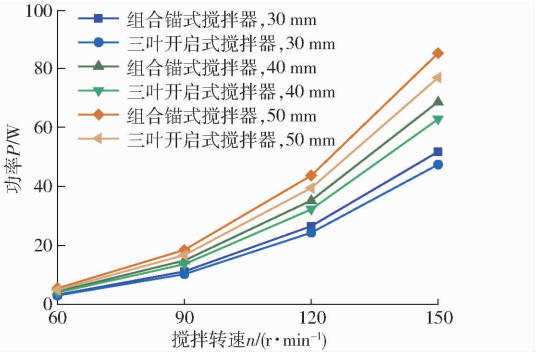


图 12 连续式咸淡水搅拌反应器不同搅拌器类型和桨叶宽度条件下搅拌器功率与转速关系曲线

Fig. 12 Relationship between stirrer power and for continuous salt and freshwater stirred reactors with different forms of stirrer types and paddle widths

开启式搅拌器更显著。相比较而言,搅拌转速对搅拌功率的影响程度比桨叶宽度的影响程度更大。另外,组合锚式搅拌器搅拌功率均比相同工况下三叶开启式搅拌器搅拌功率高 10% 左右。主要原因是组合锚式搅拌器在混合过程中会使反应釜内的液体产生底部到顶部的上推式循环流动,从而使其功率受搅拌转速变化和桨叶宽度变化的影响较为剧烈,当液体流态及均匀度稳定以后,这种特征消耗的搅拌功率中,存在无效部分,造成能量浪费。

研究高效咸淡水混合技术及配套设备需要考虑在保障作物生育期需水水质、水量的前提下,快速、高效、节能地将咸水等非常规水资源与淡水相混合并输送至田间进行灌溉。综上内容选择低搅拌转速(90 r/min)、宽桨叶(50 mm)的双层三叶开启式搅拌器,能同时兼顾系统混合效率及经济效益,更好满足农业生产实际需求。

3 结论

(1)对于组合锚式搅拌器和三叶开启式搅拌器,随着转速增加反应釜内液体流速和湍动能均显著提高,咸水体积分数空间分布均匀性增加,混合水达到均匀状态所需时间缩短。桨叶宽度的增加对液体流速和湍动能影响不大,但显著扩大了湍动能和流速的作用范围,从而对缩短混合均匀所需时间也起到了一定作用。

(2)相比于桨叶宽度,搅拌转速对流速、湍动能、咸水体积分数分布及混合均匀度的影响明显更大。相同工况下,相比于三叶开启式搅拌器,组合锚式搅拌器混合效率略高,但功耗增加显著。因此组合锚式搅拌器适用于停留时间较长、进出水量较小的连续式搅拌反应器。而三叶开启式搅拌器能效较高,则适合停留时间较短、进出水量较大的连续式搅拌反应器。

(3)综合考虑农田灌溉用水需求、混合效率及能耗等因素,推荐采用较低搅拌转速(90 r/min)、宽桨叶(50 mm)的双层三叶开启式搅拌器,该配置能够在确保混合效率的同时,有效控制能耗,降低运行成本,从而更好地满足实际需求。

参 考 文 献

[1] 石俊峰,郑源,张海晟,等. 双曲面搅拌器翼型及安装高程对搅拌性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(12):1254 – 1260.
SHI Junfeng, ZHENG Yuan, ZHANG Haisheng, et al. Influence of airfoil and installation elevation of hyperboloid agitator on mixing performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(12): 1254 – 1260. (in Chinese)

[2] 董霖,王爽,欧阳锐凌,等. 网带式花椒干燥机流场模拟与结构优化[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):373 – 380.
DONG Lin, WANG Shuang, OUYANG Ruiling, et al. Flow field simulation and structural optimization of mesh-belt pepper drying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 373 – 380. (in Chinese)

[3] 李双喜,宋子锋,杨兴,等. 气液两相射流搅拌流场分析及工艺参数影响规律研究[J]. 流体机械,2023,51(7):17 – 23,52.
LI Shuangxi, SONG Zifeng, YANG Xing, et al. Analysis of gas-liquid two-phase jet mixing flow field and numerical simulation of influence of process parameters[J]. Fluid Machinery, 2023, 51(7): 17 – 23, 52. (in Chinese)

[4] LI L, GU Z, XU W, et al. Mixing mass transfer mechanism and dynamic control of gas-liquid-solid multiphase flow based on VOF – DEM coupling[J]. Energy, 2023, 272: 127015.

[5] 叶晓琰,王朋,张德胜,等. 不同叶片后掠角度下轴流泵叶顶区空化流场与性能研究[J]. 农业机械学报,2022,53(10):194 – 201.
YE Xiaoyan, WANG Peng, ZHANG Desheng, et al. Cavitation flow field in tip region and performance of axial flow pump under different blade swept angles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 194 – 201. (in Chinese)

[6] ZHANG X, CHENG J, LIU X, et al. Computer assisted design and flow field analysis of a multi-tube airlift reactor for biological treatment of oily wastewater[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 56: 104411.

[7] 石贵振,王永江. 内循环式浆料好氧发酵反应器的流场与传热分析及其参数优化[J]. 华中农业大学学报,2021,40(6):203 – 210.
SHI Guizhen, WANG Yongjiang. Flow field and heat transfer and parameter optimization of an internal circulation slurry aerobic

fermentation reactor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(6):203 – 210. (in Chinese)
[8] 孙文峰,王进,常晋恺,等.喷雾机预混装置动态流场分析与参数优化[J].农业机械学报,2023,54(4):83 – 95.
SUN Wenfeng, WANG Jin, CHANG Jinkai, et al. Dynamic flow field analysis and parameter optimization of premixing device of spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):83 – 95. (in Chinese)
[9] CHEN T, WANG L Q, WU D Z, et al. Investigation of the mechanism of low-density particle and liquid mixing process in a stirred vessel[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2012, 90(4): 925 – 935.
[10] 徐莹,汤方平,许乔.基于轴流泵叶轮设计的潜水搅拌器特性分析[J].中国农村水利水电,2019(4):178 – 182.
XU Ying, TANG Fangping, XU Qiao. Characteristic analysis of sumbmersible agitator based on design of axial flow pump impeller[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(4):178 – 182. (in Chinese)
[11] 吴壮壮,牛智有,刘梅英,等.基于响应面法的仔猪配奶罐搅拌器数值模拟与优化[J].华中农业大学学报,2023,42(1):248 – 257.
WU Zhuangzhuang, NIU Zhiyou, LIU Meiying, et al. Numerical simulation and optimization of stirrer in piglet milk tank based on response surface method[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2023,42(1):248 – 257. (in Chinese)
[12] 李芦雨.组合式搪玻璃搅拌器流场特性研究[D].常州:常州大学,2022.
LI Luyu. Study on flow field characteristics of combined glass lined agitator[D]. Changzhou:Changzhou University,2022. (in Chinese)
[13] 周勇军, 袁名岳, 孙存旭. 改进型框式组合桨搅拌釜内流场特性[J]. 化工进展, 2019, 38(12): 5306 – 5313.
ZHOU Yongjun, YUAN Mingyue, SUN Cunxu. Investigating on flow field in stirred tank equipped with improved frame type combined impellers[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(12): 5306 – 5313. (in Chinese)
[14] 韩太柏,金光远,邹鹏程,等.一种连续流反应器内射流耦合搅拌流的混合特性[J].化学工业与工程,2023,40(2):133 – 142.
HAN Taibai, JIN Guangyuan, ZOU Pengcheng, et al. Mixing characteristics of continuous flow reactor coupled with jet and mechanical stirring[J]. Chemical Industry and Engineering,2023,40(2):133 – 142. (in Chinese)
[15] WONGJAIKHAM W, WONGSAWAENG D, RATNITSAI V, et al. Low-cost alternative biodiesel production apparatus based on household food blender for continuous biodiesel production for small communities[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 13827.
[16] TOSON P, DOSHI P, JSJCEVIC D. Explicit residence time distribution of a generalised cascade of continuous stirred tank reactors for a description of short recirculation time (bypassing)[J]. Processes, 2019, 7(9): 615.
[17] MUMBACH G D, LENZ D L G, WENZEL B M. Investigation of hydrodynamic non-idealities in a pilot-scale pond bioreactor [J]. Journal of Water Process Engineering, 2018, 23: 97 – 108.
[18] RAJAVATHSAVAI D, KHAPRE A, MUNSHI B. Study of mixing behavior of CSTR using CFD[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2014, 31: 119 – 129.
[19] 中华人民共和国工业和信息化部.机械搅拌设备:HG/T 20569—2013[S]. 北京: 化学工业出版社,2014.
[20] JIA Z, XU L, DUAN X, et al. CFD simulation of flow and mixing characteristics in a stirred tank agitated by improved disc turbines[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, 50: 95 – 107.
[21] 周毅林.逆流桨搅拌反应器内流体混合特性研究[D].重庆:重庆大学,2022.
ZHOU Yilin. Study on fluid mixing performance in rigid-flexible counter-flow pitched-blade turbine stirred reactor[D]. Chongqing:Chongqing University,2022. (in Chinese)
[22] 高一博, 耿琳琳, 王振, 等. 基于欧拉-欧拉方法的气液两相流数值模型发展综述[J]. 力学与实践, 2022, 44(5): 1021 – 1036.
GAO Yibo, GENG Linlin, WANG Zhen, et al. A review on the development of numerical modeling of gas-liquid two-phase flow based on Eulerian – Eulerian approach[J]. Mechanics in Engineering,2022, 44(5): 1021 – 1036. (in Chinese)
[23] 岳相丞, 石艳, 廖映华, 等. 大叶片搅拌器在 EVOH 聚合釜中的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11739 – 11746.
YUE Xiangcheng, SHI Yan, LIAO Yinghua, et al. Numerical simulation of large-blade agitator in EVOH polymerization reactor[J]. Science Technology and Engineering,2023, 23(27): 11739 – 11746. (in Chinese)
[24] 李国栋, 苗洲, 高蓓, 等. 琴键堰不同溢流前缘泄流特性的数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(8): 78 – 85.
LI Guodong, MIAO Zhou, GAO Bei, et al. Numerical study on discharge capacity of piano-key weir at its different overflow edges[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015, 34(8): 78 – 85. (in Chinese)
[25] 王福军. 水泵与泵站流动分析方法[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.
[26] 张赫铭, 李文昊, 何新林, 等. 不同管径水平管道气液两相流动数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(5): 488 – 494.
ZHANG Heming, LI Wenhao, HE Xinlin, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipeline with different diameters[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2021, 39(5): 488 – 494. (in Chinese)
[27] ZENG C, WANG W. Modeling method for variable and isotropic permeability design of porous material based on TPMS lattices [J]. Tribology International, 2022, 176: 107913.
[28] 宋月鹏, 张帅, 李天华, 等.果园混肥器设计与数值模拟分析[J].农业机械学报,2018,49(增刊):181 – 188.

SONG Yuepeng, ZHANG Shuai, LI Tianhua, et al. Design and numerical simulation analysis of orchard fertilizer mixer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 181 - 188. (in Chinese)

[29] 冯静安, 唐小琦, 王卫兵, 等. 基于网格无关性与时间独立性的数值模拟可靠性的验证方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2017, 35(1): 52 - 56.
FENG Jing'an, TANG Xiaoqi, WANG Weibing, et al. Reliability verification method of numerical simulaion based on grid independence and time independence[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2017, 35(1): 52 - 56. (in Chinese)

[30] 高雄发,郜聪,张德胜,等. 基于 CFD - DEM 的旋流泵混合颗粒固液两相流研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 163 - 170, 248.
GAO Xiongfa, GAO Cong, ZHANG Desheng, et al. Solid-liquid two-phase flow of mixed particles in vortex pump based on CFD - DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 163 - 170, 248. (in Chinese)

[31] MOROVATI K, HOMER C, TIAN F, et al. Opening configuration design effects on pooled stepped chutes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 147(9): 06021011.

[32] YUE X, SHI Y. Flow characteristics analysis of a new combination agitator based on CFD[J]. Academic Journal of Science and Technology, 2023, 5(1): 120 - 125.

[33] MITTAK G, KIKUGAWA R I. Computational fluid dynamics simulation of a stirred tank reactor[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 11015 - 11019.

[34] 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 Ting, JIA Zhuotai, ZHANG Qinghua, et al. Comparison of macro-mixing charateristics of a stirred tank with different impellers[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 70(1): 32 - 38. (in Chinese)

[35] LIU Y, WACHEMO A C, YUAN H R, et al. Anaerobic digestion performance and microbial community structure of corn stover in three-stage continuously stirred tank reactors[J]. Bioresource Technology, 2019, 287: 121339.

[36] LI L, WANG K, ZHAO Q, et al. A critical review of experimental and CFD techniques to characterize the mixing performance of anaerobic digesters for biogas production[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/technology, 2022, 21(3): 665 - 689.

(上接第 341 页)

[28] 石鑫,杨豫新,牛长河,等. 基于 Fluent 分析的棉田废地膜秸秆分离装置设计[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(4): 1062 - 1071.
SHI Xin, YANG Yuxin, NIU Changhe, et al. Design of cotton field waste mulch straw separation device based on Fluent analysis[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(4): 1062 - 1071. (in Chinese)

[29] 解臣硕. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置理论研究与试验[D]. 泰安:山东农业大学, 2023.
XIE Chenshuo. Theoretical research and experiment on the screen hole cleaning device of the drum screen membrane air separator[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[30] 靳伟,丁幼春,农峰,等. 抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 71 - 82.
JIN Wei, DING Youchun, NONG Feng, et al. Design and test of excavating and conveying device with vibrating chain tooth and bar for residual film - soil - straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 71 - 82. (in Chinese)

[31] 朱新华,伏胜康,李旭东,等. 不同含水率羊粪离散元参数通用标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 34 - 41.
ZHU Xinhua, FU Shengkang, LI Xudong, et al. General method for discrete element parameters calibration of goat manure with different moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 34 - 41. (in Chinese)