

多桨变速对脱硫浆液池搅拌均匀性影响的数值分析

莫维源¹, 郭雪岩¹, 李春¹, 于建军²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 天津市合润科技有限责任公司, 天津 300380)

摘要: 为了研究多桨变速搅拌对脱硫搅拌池均匀性的影响, 以均匀布置 3 个搅拌桨的大型侧进式搅拌器为研究对象, 基于欧拉两相流模型和 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 建立了三维瞬态模型。对比了匀速搅拌与多桨变速搅拌工况下的均匀性, 探讨了固相体积分数对变速搅拌的影响, 分析了不同变速方式、振幅及频率对搅拌池内部均匀性的作用。研究表明, 变速搅拌能有效减少底部固体颗粒的堆积, 其中三桨变速搅拌效果最优, 相较于匀速搅拌高体积分数区域减少 13.62%。随着固相体积分数从 0.2 增加至 0.5, 多桨变速搅拌均能降低搅拌后的不均匀性, 低体积分数时的变速搅拌改善效果较好。变速搅拌速度幅度较大、频率适中时, 均匀性更好。多种变速方式中, 梯形变速方式的搅拌效果最佳。

关键词: 脱硫; 侧进式搅拌器; 变速搅拌; 数值模拟; 多相流

中图分类号: TQ 027 **文献标志码:** A

Numerical analysis of the influence of multi-paddle variable speed on the mixing uniformity in desulfurization slurry tanks

MO Weiyuan¹, GUO Xueyan¹, LI Chun¹, YU Jianjun²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Tianjing Herun Technology Co., Ltd., Tianjing 300380, China)

Abstract: To investigate the effect of multi-paddle variable-speed stirring on the uniformity of a desulfurization stirring tank, a large side-entering agitator with three evenly distributed impellers was taken as the research object. A three-dimensional transient model was established based on the Eulerian two-phase flow model and the $k-\varepsilon$ turbulence model. The uniformity under constant-speed stirring and multi-paddle variable-speed stirring conditions was compared. The influence of solid volume fraction on variable-speed stirring was discussed, and the effects of different variable-speed patterns, amplitudes,

收稿日期: 2025-01-08

基金项目: 国家重点研发计划资助(2024YFA1012501)

第一作者: 莫维源(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 计算流体力学及应用。E-mail: 18389383615@163.com

通信作者: 郭雪岩(1964—), 男, 教授。研究方向: 计算流体力学及应用。E-mail: xyguo@usst.edu.cn

引文格式: 莫维源, 郭雪岩, 李春, 等. 多桨变速对脱硫浆液池搅拌均匀性影响的数值分析[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(2): 121-128.

Citation: MO Weiyuan, GUO Xueyan, LI Chun, et al. Numerical analysis of the influence of multi-paddle variable speed on the mixing uniformity in desulfurization slurry tanks[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(2): 121-128.

and frequencies on the internal uniformity of the stirring tank were analyzed. The results show that variable-speed stirring can effectively reduce the accumulation area of solid particles at the bottom. Among the methods, three-impeller variable-speed stirring achieves the best effect, reducing the high solid volume fraction region volume by 13.62% compared to constant-speed stirring. As the solid volume fraction increases from 0.2 to 0.5, multi-paddle variable-speed stirring consistently reduces the non-uniformity, with better improvement at lower solid volume fractions. Larger speed amplitudes and moderate frequencies lead to better uniformity, and among various variable-speed patterns, the trapezoidal variable-speed method exhibits the best stirring performance.

Keywords: *desulphurization; side-entering agitator; variable-speed stirring; numerical simulation; multiphase flow*

湿法烟气脱硫技术是燃煤火电厂广泛应用的二氧化硫脱除技术^[1-2], 脱硫塔搅拌池是湿法脱硫系统的核心部件, 其内部多相流场会影响系统的性能。脱硫搅拌池普遍采用侧进式搅拌器, 流体通过桨叶的推动来获得动能, 形成适宜的流场, 达到搅拌混合的目的^[3-4]。变速搅拌是常见的强化搅拌方式, 应用于多种实际工业生产中^[5], 为脱硫搅拌池提供了参考价值。由于脱硫塔搅拌池的体积较大, 直接针对整体系统进行流体力学的实验研究颇为困难, 故国内外的研究主要集中在计算流体力学模拟和小型搅拌槽的实验上^[6-9]。

Yao 等^[10]利用含正反转周期的搅拌和转速随时间周期性波动的搅拌, 实验研究了搅拌罐中流体的混合性能, 发现正反转周期的频率越高, 速度周期波动的幅度越大, 混合时间越短。Li 等^[11]采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟研究了无挡板罐中正反转叶轮搅拌的流体特性, 分析了非定常搅拌模式下最大转速和循环时间对流场和功耗的影响。杨锋苓等^[12]研究了周期性变速搅拌方案下搅拌槽内的混合特性, 说明变速搅拌在低黏度流体的湍流混合与传质方面也具有一定的优势。韦乃团等^[13]提出了一种变速机械搅拌与蒸汽喷吹相结合的强化混合工艺, 增加了搅拌釜的混沌流区域, 以提高搅拌反应釜内部的整体混合效率。Wang 等^[14]对正弦函数变速搅拌体系、梯形函数变速搅拌体系和匀速搅拌体系进行对比研究。同时, 对不同搅拌周期的正弦函数变速搅拌体系及匀速搅拌体系的模拟进行对比研究, 得出正弦函数变速搅拌体系优于匀速搅拌体系和梯形函数变速搅拌体系的结论。Ji 等^[15]提出了一种变速搅拌的方法, 采用欧拉多相流模型研究了变速搅拌条件下脱硫剂与高硫铁水的混合

行为, 对颗粒体积分数、混合时间和功率消耗进行了讨论, 发现变速搅拌可以改善传统的流场, 增加脱硫剂的夹带和分散。总而言之, 关于变速搅拌已有一定的研究基础, 但大多集中于顶进式搅拌器, 对大型的脱硫侧进式搅拌器的变速研究还存在一定的欠缺。

本文采用 CFD 方法, 研究了脱硫搅拌池中多桨变速工况下的固液两相流场特性, 分析了变速桨个数、固相体积分数、变速周期以及多种变速方式对脱硫搅拌池混合均匀性的影响。

1 几何模型和数值方法

1.1 几何模型

搅拌池直径 $D=14\text{ m}$, 液位高度 $H=5.0\text{ m}$, 在距底面高度 $h_1=1.1\text{ m}$ 处均匀布置 3 个侧进式搅拌桨。搅拌桨的水平安装角 $\theta=5^\circ$, 竖直安装角 $\alpha=9^\circ$; 搅拌轴长度 $L=0.55\text{ m}$, 其直径忽略不计。搅拌桨为端板螺旋桨, 其主要的结构参数见表 1。搅拌池和搅拌桨模型如图 1 所示。

表 1 端板螺旋桨主要结构参数

结构参数	数值
桨叶数/个	3
桨叶直径/m	1
中心轴径/mm	86.2
桨叶厚度/mm	6
端板长度/mm	225

1.2 数值方法

流体力学的基本控制方程包括连续性方程、动量方程和能量方程。本文选用 Ansys Fluent 的流

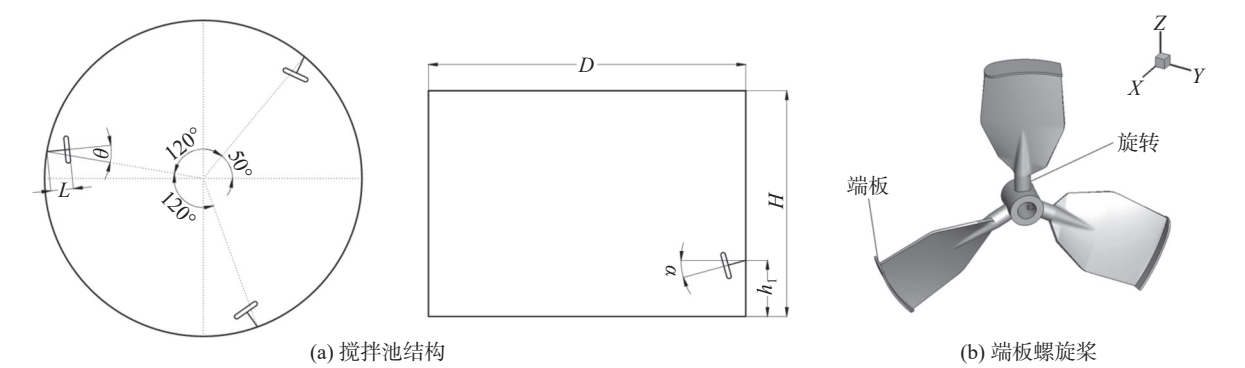


图 1 搅拌池和搅拌桨模型

Fig.1 Stirring tank and stirring paddle models

动求解器进行数值模拟，其控制方程具体如下。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

式中： ρ 为流体密度； t 为时间； $\mathbf{u}$ 为速度矢量。

动量方程：

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \tag{2}$$

式中： P 为流体压力； μ 为黏度； $\mathbf{f}$ 为体积力。

本文数值计算采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。因固相体积分数较高，多相流模型为欧拉-欧拉多相流模型^[16-17]；压力速度耦合采用 Phase Coupled SIMPLE 算法；离散格式采用二阶迎风；使用双精度求解器以提高精度；模拟过程考虑重力影响；壁面给定无滑移条件。

基于榆林发电厂吸收塔的工况，搅拌器转速基值设为 206 r/min，搅拌桨沿圆周切线方向旋转，推力指向搅拌池内部(本文中搅拌桨旋转方向和推力方向均同于此)。实际脱硫的混合过程中，液相流是水及其他反应溶剂的混合物，故液相流的密度和黏度设定如下：密度为 1300 kg/m³，动力黏度为 2×10⁻³ Pa·s；固体颗粒为 CaSO₄，固体颗粒粒径设置为 0.15 mm，密度为 1770 kg/m³。固相体积分数无特殊说明时，均设为 0.2。

1.3 网格无关性验证

采用多重参考系方法 (multiple reference frame, MRF)对搅拌池中动静区域进行分区，并对转动区域进行加密处理，在流场变化不剧烈的区域使用更为稀疏的网格。通过计算固液两相流搅拌池的流场，来验证网格无关性。根据图 2(图 2 中 h 为水平截面高度)和表 2 可知，当网格数量增加到约 3.96×10⁶ 时(网格划分如图 3 所示，模型采用非结构化六面体网格，并在搅拌桨区域进行了局部加

密)，能够平衡计算精度与计算资源消耗。因此，后文中选择该网格数量进行数值计算。

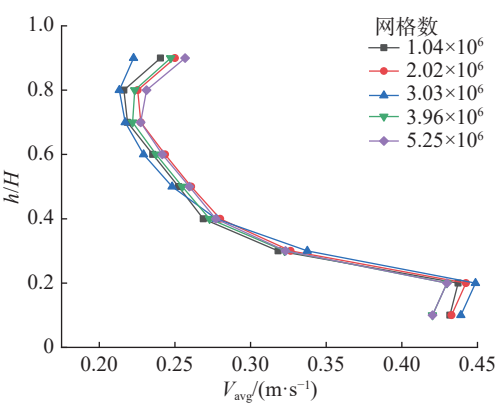


图 2 不同网格数下高度与流速的关系

Fig.2 Relations between flow velocity and height under different grid numbers

表 2 网格无关性

Tab.2 Grid independence

网格数	加权平均速度/(m·s ⁻¹)	误差/%
1.04×10 ⁶	0.2947	—
2.02×10 ⁶	0.3024	2.546
3.03×10 ⁶	0.2948	2.513
3.96×10 ⁶	0.2957	0.305
5.25×10 ⁶	0.2998	1.387

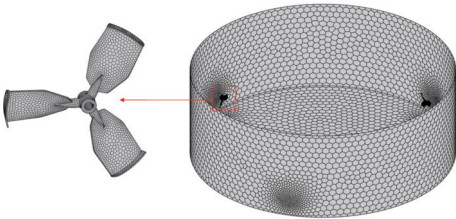


图 3 侧进式搅拌器网格示意图

Fig.3 Schematic diagram of the grids for the side-entering agitator

1.4 均匀性评估方法

为了定量比较脱硫搅拌池内固液混合后的均

匀性，本研究选择相对标准差(σ_{RSD})混合指标来评估混合效果，其计算公式如下：

$$\sigma_{\text{RSD}} = \frac{\sigma}{C_{\text{avg}}} \tag{3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - C_{\text{avg}})^2}{N - 1}} \tag{4}$$

式中： N 为搅拌池内选取的样本点总数； σ 为固相体积分数方差； C_i 为样本点固相体积分数； C_{avg} 为搅拌池内平均固相体积分数。

通过后处理软件CFD-post在计算结果(每个网格单元)中随机选取 1×10^5 个左右的样本点，并分别输出各点的固相体积分数数据，最后通过式(3)和(4)进行计算，得出相对标准差。相对标准差越小，说明提取的各点固相体积分数值越接近搅拌池整体的平均值，意味着流场更加均匀。

2 结果与讨论

2.1 多桨变速对流场均匀性的影响

匀速搅拌工况下，脱硫搅拌池内3个搅拌桨均设置为匀速；单桨变速工况下，1个搅拌桨设置为变速搅拌，其余2个搅拌桨设为匀速搅拌；双桨变速工况下，2个搅拌桨设置为变速搅拌，其余1个搅拌桨设为匀速搅拌；三桨变速工况下，3个搅拌桨均设置为变速搅拌。搅拌器匀速搅拌的转速设为206 r/min，搅拌时间为120 s，变速工况

下，采用极值速度与匀速相差为10 rad/s的正弦速度 Δv ，设60 s为一个变速周期。在30 s前，变速工况下的速度大于匀速工况下的；30~60 s期间，变速工况下的速度小于匀速工况下的，如图4所示。搅拌时间内，匀速与变速工况的搅拌速度平均值和搅拌旋转圈数相同，以确保两种速度工况在相近的功耗下进行流场及均匀性的比较。

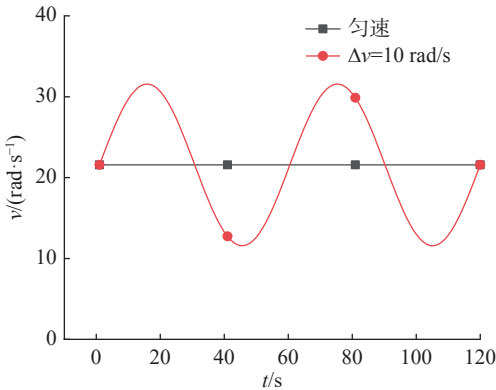


图4 匀速和变速工况下的搅拌速度

Fig.4 Stirring speed at constant speed and variable speed

在搅拌桨旋转的作用下，搅拌池内产生涡流使固液两相能够混合以及固相能够悬浮。图5为搅拌池中高1 m处水平截面上的流线和速度分布，匀速搅拌稳定后，中心会有混合不良的低速区域。采用变速搅拌，搅拌池内的速度分布和涡流大小及位置会随时间的增加而发生变化，能够有效改善该区域，其中三桨变速的搅拌方式能使流体从3个方向“挤压”并混合不良的区域，更好地减少该区域的面积。

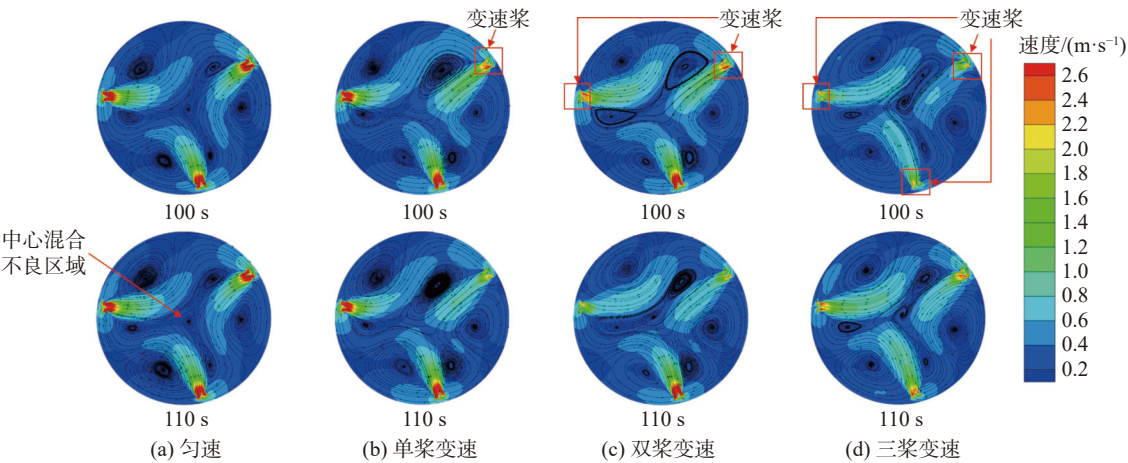


图5 搅拌池高1 m处水平截面上的流线和速度分布

Fig.5 Streamline and velocity distribution on the horizontal section at a height of 1 m in the stirring tank

变速工况下，搅拌桨旋转速度高于匀速时为高速段，低于匀速时为低速段。如图6所示，变速工况下，搅拌池内流体的体平均速度高于匀

速工况下的。在高速段内，流体的体平均速度越来越高于匀速工况下的；在低速段内，流体的体平均速度从高于转变为近似等于匀速工况下的。

三桨变速在高速段内流体速度提升更快, 在低速段内速度下降得也更快, 流体的速度波动范围更广, 随着变速桨个数的减少, 这一速度变化趋势逐渐平缓。搅拌桨高速旋转作用后, 即使搅拌速度变低, 流体的体平均速度仍然会在一定时间内处于较高水平, 所以变速搅拌的效果优于匀速搅拌的效果。

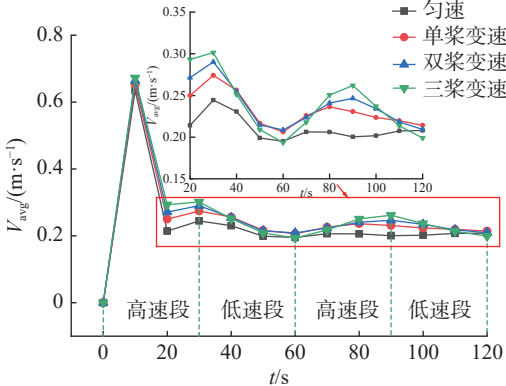


图 6 搅拌池内流体的体平均速度

Fig.6 Average volume velocity of fluid in stirring tank

固体颗粒在重力作用下, 在搅拌池底部容易形成颗粒堆积。图 7 表明, 固体颗粒在底部主要集中在远离中心的四周处, 少部分分布在混合不良的中心涡流区域, 采用多桨变速搅拌能够减少底部固体颗粒的堆积, 随着变速桨个数的增加, 底部固体颗粒堆积的区域高度逐渐降低。

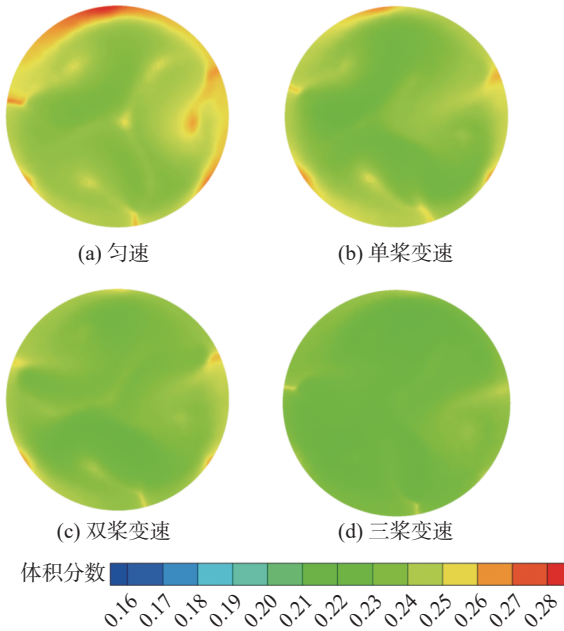


图 7 搅拌池底部的 CaSO_4 体积分数分布

Fig.7 CaSO_4 volume fraction distribution at the bottom of the stirring tank

表 3 为多桨变速搅拌后的 CaSO_4 固相高体积分数区 (设定为固相体积分数高于 0.23 区域) 的体

积数以及占比, 相比于匀速搅拌工况下 15.73% 的固相高体积分数体积占比, 单桨变速的下降了 6.68%、双桨变速的下降了 8.89% 以及三桨变速的下降了 13.62%。在采用变速搅拌后, 体积分数为 0.23~0.25 的区域相比匀速搅拌的发生了较明显的减少, 而 0.25 及以上体积分数区体积也减少至极小的数值。

表 3 各模型高体积分数区体积统计表

Tab.3 Statistical table of the volume of high concentration area of each model

模型	搅拌池 体积/ m^3	0.23~0.25 体积 分数区体积/ m^3	0.25 及以上 体积 分数区体积/ m^3	高体积分数区 体积占比/%
匀速	769	117.57	3.390 00	15.73
单桨变速	769	69.37	0.210 00	9.05
双桨变速	769	52.54	0.034 00	6.84
三桨变速	769	16.19	0.000 97	2.11

为了研究多桨变速对含不同体积分数 CaSO_4 固相的固液体系搅拌效果的影响, 容器搅拌前, CaSO_4 固相体积分数分别设为 0.20、0.30、0.40 和 0.50。由表 4 可知, 在一定 CaSO_4 固相体积分数下, 整体而言采用多桨变速能使相对标准差降低, 其中三桨变速取得的效果最好。在固相体积分数为 0.20、0.30、0.40 和 0.50 的条件下, 三桨变速计算后获得的相对标准差相比匀速搅拌的分别下降了 4.30%、3.55%、2.09% 和 1.27%, 表明三桨变速能在不同固相体积分数的工况下改善搅拌后的均匀性。

表 4 各模型搅拌后的相对标准差

Tab.4 Relative standard deviation of each model after stirring

CaSO_4 体积分数	σ_{RSD}			
	匀速	单桨变速	双桨变速	三桨变速
0.2	25.30%	23.49%	22.80%	21.00%
0.3	19.52%	19.89%	17.29%	15.97%
0.4	12.25%	10.62%	10.34%	10.16%
0.5	6.78%	5.78%	5.55%	5.51%

当 CaSO_4 固相体积分数从 0.2 增加至 0.5 时, 无论是匀速还是变速搅拌, 整体的相对标准差呈现下降的趋势, 体现了固相占比较高时, 容易获得一个混合均匀度较高的固液流场。从数据上分析, 在固相体积分数较高时, 变速搅拌取得的效果反而会不明显; 低固相体积分数时, 均匀性改善程度较好。

2.2 变速振幅和频率对搅拌均匀性的影响

当 CaSO_4 固相体积分数为 0.30 时 (见 2.1 节),

三桨变速搅拌的效果较为明显且还能保证相对标准差处于 20% 以下，故在此条件下研究不同频率以及不同幅度的正弦搅拌速度。在研究不同幅度的正弦搅拌速度对脱硫搅拌池均匀性的影响时，分别设置了正弦极值速度与匀速差值为 5、10、15、20 rad/s 的 4 种正弦搅拌速度（如图 8 所示）。在研究变速频率对搅拌均匀性的影响时，设置了 120 s 内，分别含有 1、2、3、4 个正弦变速周期 T 的搅拌速度（如图 9 所示）。

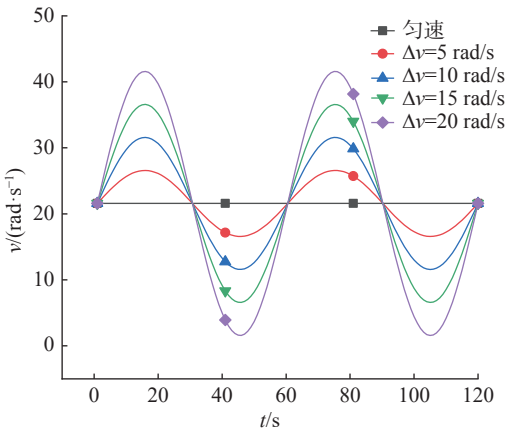


图 8 各幅度下的正弦速度

Fig.8 Sinusoidal velocities at various amplitudes

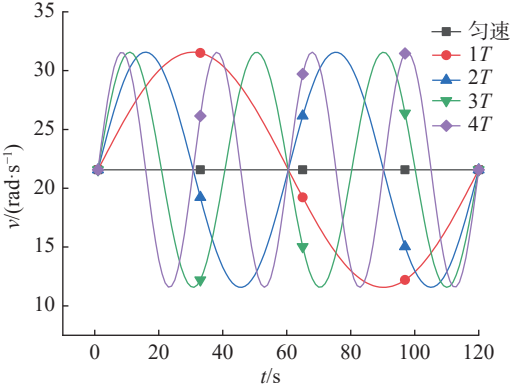


图 9 各频率下的正弦速度

Fig.9 Sinusoidal velocities at various frequencies

图 10 中，随着搅拌时间的增加，搅拌池内体积分数的相对标准偏差随搅拌时间的增加而逐渐减小，这说明混合均匀性随搅拌时间的增加不断提高。采用匀速搅拌时，相对标准差在搅拌时间达到 120 s 后，下降到 19.52%，采用 Δv 为 5、10、15、20 rad/s 的正弦速度搅拌后，相对标准差分别下降到 20.13%、15.97%、14.63% 和 11.75%。由此可以得知，当采用的正弦速度幅度较小时，搅拌的效果略优于匀速搅拌的，在幅度小到一定程度时，搅拌的效果不如匀速搅拌的；当正弦速度幅度较大时，搅拌后的均匀性越好。在较大振幅的

变速搅拌条件下，搅拌过程中形成的稳定涡流结构更易被打破，进而激发出更加复杂且具有较强剪切特性的非规则流动。这种流动特征有助于削弱流场中的静区与循环死角，显著降低混合过程中的相对标准差，从而有效提升固液搅拌体系的混合均匀性。

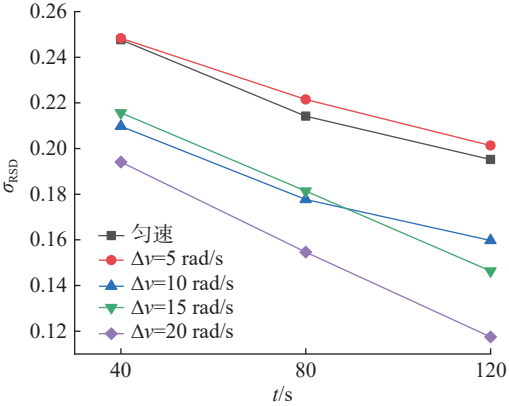


图 10 各幅度正弦速度工况下相对标准差与时间的关系

Fig.10 Relationship between the relative standard deviation and time under sinusoidal velocity conditions of various amplitudes

图 11 中，搅拌池内体积分数的相对标准偏差随搅拌时间的增加而逐渐减小。采用匀速搅拌时，相对标准差在搅拌时间达到 120 s 后下降到 19.52%。而采用 1~4 个正弦变速周期搅拌后，相对标准差值分别下降到 18.91%、15.97%、17.25% 和 17.04%。1~4 个正弦变速周期的最终搅拌效果均优于匀速搅拌的，采用两个变速周期的效果最好。

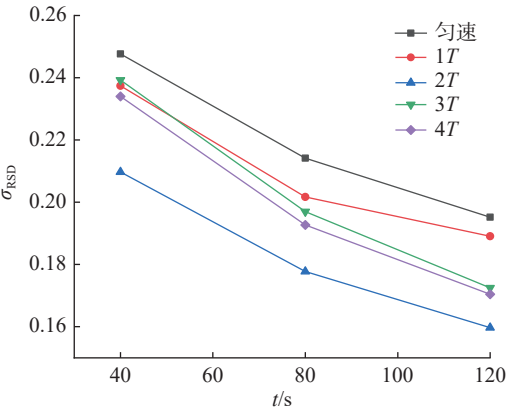


图 11 各频率正弦速度工况下相对标准差与时间的关系

Fig.11 Relationships between the relative standard deviation and time under sinusoidal velocity conditions at each frequency

结合相对标准差曲线图和数据分析可知，在限定的搅拌时间内，变速搅拌的频率并非越快越优。混合过程需要一定的时间，以便充分建立有效的流场结构，实现固液相的良好分散与混合。

若变速频率过快, 搅拌速度尚未在高转速阶段对混合产生显著影响, 便迅速切换至下一个速度阶段, 导致搅拌桨产生的剪切和推进作用未能充分发挥, 反而影响最终混合均匀性的提升, 难以达到最优效果。

综合正弦变速振幅和频率对混合均匀性的影响, 采用两个周期、极值速度与匀速差值为 20 rad/s 的正弦变速效果最佳。

2.3 变速方式对搅拌均匀性的影响

三桨变速体系中, 在控制搅拌平均速度和搅拌旋转圈数相同的条件下, 如图 12 所示, 对正弦变速、梯形变速、矩形变速、折线形变速 4 种变速搅拌方式以及匀速搅拌方式进行了均匀性分析。

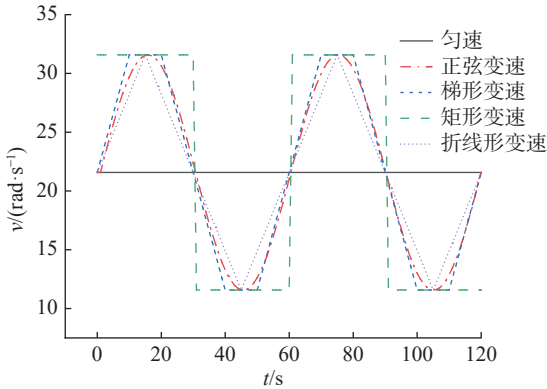


图 12 变速方式
Fig.12 Variable-speed method

变速搅拌过程中, 如图 13 所示。由于搅拌前 CaSO₄ 固体颗粒在搅拌器上方, 所以搅拌刚开始时整体的液相流速会增加到峰值。随着固体颗粒的沉降, 液相和固相发生混合, 流体流动速度会逐渐稳定。各变速方式搅拌体系下, 流体的体平

均速度与极值速度维持的时间有关, 这 4 种变速搅拌方式的体平均速度皆大于匀速搅拌的。受变速波形的影响, 矩形变速在高速段流体速度增加得快, 在低速段流体速度下降得也快, 采用矩形变速时的流体速度最大, 采用梯形变速、折线形变速和正弦变速时流体速度较为接近, 变速体系下整体的流动速度都高于匀速的。

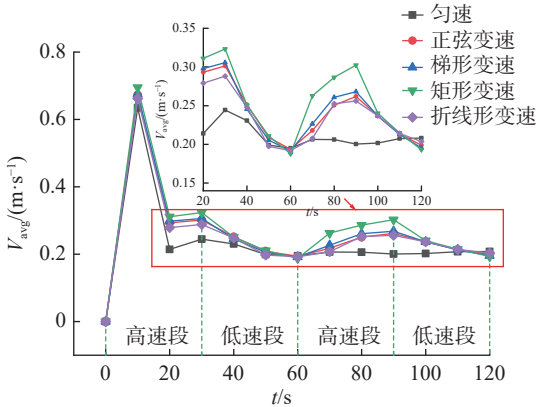


图 13 各变速方式下流体的体平均速度
Fig.13 Volume-averaged fluid velocity under different variable-speed methods

各种变速方式对脱硫搅拌池的均匀性有不同程度的影响, CaSO₄ 固相体积分数为 0.235 的等值面如图 14 所示。匀速搅拌时, 由于速度恒定, 搅拌池内流场趋于稳定, 容易产生搅拌不良、高体积分 CaSO₄ 堆积的区域; 折线形变速搅拌后较匀速搅拌后的底部中心的高体积分区域明显减少; 矩形变速搅拌主要减少了搅拌桨附近的高体积分区域; 正弦和梯形变速进一步减少了底部四周堆积的 CaSO₄ 颗粒。

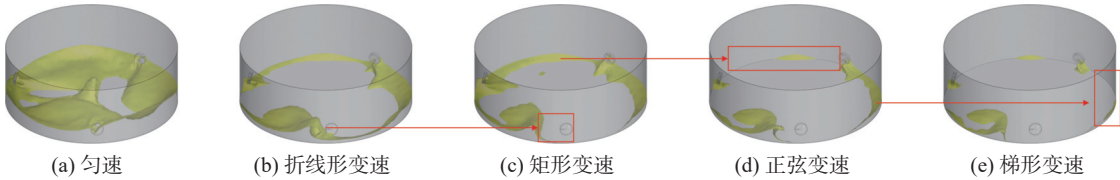


图 14 各变速方式下 CaSO₄ 体积分数为 0.235 的等值面
Fig.14 Iso-surface of CaSO₄ volume fraction at 0.235 for different variable-speed methods

匀速搅拌以及 4 种变速搅拌方式在搅拌过程中相对标准差随时间的变化如图 15 所示。搅拌完成后, 各变速方式的相对标准差分别为匀速搅拌 25.30%、正弦变速 21.00%、梯形变速 20.32%、矩形变速 21.59%、折线形变速 22.06%。结果符合 CaSO₄ 固相体积分数为 0.235 的等值面所体现的底部沉积现象。由此可见, 搅拌后的均匀性由优到次为: 梯形变速、正弦变速、矩形变速、折线形

变速和匀速搅拌。结合 4 种变速搅拌方式的波形特征可知, 矩形变速在变速周期内的最高与最低速度阶段持续时间较长, 其次依次为梯形变速和正弦变速, 而折线形变速在最大值速度处的停留时间最短。由于搅拌流场在最大值速度阶段对内部的混合作用影响较大, 适当延长最大值速度的作用时间有助于加强混合作用。然而, 尽管矩形变速方式在极值速度区段具有较充分的作用时间, 但其

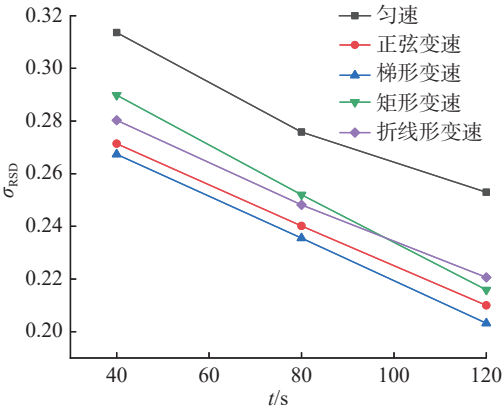


图 15 各变速方式下相对标准差与时间的关系

Fig.15 Relationships between the relative standard deviation and time under each speed change mode

变速过渡过程较短，难以有效打破原有流场中形成的规则涡旋结构，从而限制了对整体流场均匀性的改善，导致其最终混合效果并非最优水平。由此可见，高效的变速搅拌方式应在保证最值速度作用时间充足的同时，兼具适当的速度变化过程，以实现更优的流场扰动与混合性能。

3 结 论

本文选取欧拉-欧拉多相流模型和 MRF 多重参考系等方法，在多桨变速工况下对脱硫搅拌池的固液两相流场进行了数值模拟，分析了多桨变速体系下固相比例、变速方式、振幅及周期对搅拌均匀性的影响，得出以下结论：

- a. 采用多桨变速后固相高体积分数区体积减少，其中单桨变速下降了 6.68%、双桨变速下降了 8.89% 以及三桨变速下降了 13.62%，随着变速桨个数的增加，脱硫搅拌池的混合均匀性逐步提升。不同固相体积分数的搅拌工况下，随着固相体积分数从 0.2 增加至 0.5，多桨变速搅拌均能降低搅拌后的不均匀性，低体积分数时变速搅拌改善效果较好。
- b. 变速工况下，速度变化的振幅越大，变化的频率适中时，搅拌后的均匀性更好。其中，速度变化的振幅对均匀性提升的作用比频率对均匀性提升的作用要明显。
- c. 多种变速方式搅拌相对于匀速搅拌，均能提升搅拌的均匀性，矩形变速能够获得流动速度较大的流场，梯形变速方式下多相流场的均匀性更好。

参考文献：

[1] 刘高军, 姜岸, 郭玥, 等. 湿法脱硫后烟气提水及污染物

脱除技术研究 [J]. *热能动力工程*, 2021, 36(12): 56-61.

[2] 李健, 张莉. 烟气冷凝法处理湿法脱硫烟气数值模拟与应用研究 [J]. *动力工程学报*, 2024, 44(11): 1741-1749.

[3] 徐才仁. 湿法烟气脱硫工艺中脱硫塔搅拌方式探讨 [J]. *有色冶金设计与研究*, 2017, 38(5): 27-30.

[4] 杨锋苓, 周慎杰. 搅拌固液悬浮研究进展 [J]. *化工学报*, 2017, 68(6): 2233-2248.

[5] SRIRUGSA T, PRASERTSAN S, THEPPAYA T, et al. Appropriate mixing speeds of Rushton turbine for biohydrogen production from palm oil mill effluent in a continuous stirred tank reactor[J]. *Energy*, 2019, 179: 823-830.

[6] LU T T, LI K, LIU F Q, et al. Numerical simulation of solid-liquid suspension in a slurry electrolysis stirred tank[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, 189: 371-383.

[7] GU D Y, SONG Y H, XU H, et al. CFD simulation and experimental analysis of solid-liquid mixing characteristics in a stirred tank with a self-similarity impeller[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2023, 146: 104878.

[8] YANG K, YAO Q W, LI Y S, et al. Experimental investigation of particles dynamics and solid-liquid mixing uniformity in a stirred tank[J]. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 2024, 20(11): 2585-2602.

[9] 华剑, 李伟, 吕志鹏, 等. 双层桨叶搅拌罐内固液混合均匀度研究 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(28): 12080-12090.

[10] YAO W G, SATO H, TAKAHASHI K, et al. Mixing performance experiments in impeller stirred tanks subjected to unsteady rotational speeds[J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(17): 3031-3040.

[11] LI L C, XU B. CFD simulation of hydrodynamics characteristics in a tank with forward-reverse rotating impeller[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2022, 131: 104174.

[12] 杨锋苓, 曹明建. 涡轮桨变速搅拌槽内湍流混合的实验研究 [J]. *燕山大学学报*, 2010, 34(4): 313-317.

[13] 韦乃团, 王仕博, 林琳, 等. 变速机械搅拌耦合蒸汽喷吹强化多相流混合特性数值模拟 [J]. *云南化工*, 2024, 51(11): 72-77.

[14] WANG M M, WANG S B, WANG H, et al. Functional waveform pulse variable speed stirring to improve mechanistic analysis and experimental study on the purification efficiency of zinc sulfate solution[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2023, 21(1): 23-39.

[15] JI J H, LIANG R Q, HE J C. Simulation on mixing behavior of desulfurizer and high-sulfur hot metal based on variable-velocity stirring[J]. *ISIJ International*, 2016, 56(5): 794-802.

[16] 周延红, 刘胜军, 龚浩, 等. 高固含率搅拌槽内临界转速的 CFD 模拟 [J]. *化工设备与管道*, 2023, 60(1): 48-54.

[17] 张晓雨, 龙梅, 孔德旭, 等. 桨叶类型对搅拌槽固液流动特性影响的数值模拟研究 [J]. *化学工程师*, 2020, 34(6): 18-21.