

双层折流板三弧叶浆釜内流场的特性研究

卢贤俊¹, 许家宝¹, 徐子强¹, 陶兰兰², 周勇军¹

(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816;

2. 江苏省特种设备安全监督检验研究院 国家化工设备质量监督检验中心, 江苏 苏州 215600)

摘要:通过粒子图像测速技术(PIV)研究了双层折流板三弧叶组合浆搅拌槽内转速 N 、离底距 C_1 及桨间距 C_2 的变化对流场产生的影响,并对双层折流板三弧叶浆和双层无折流板三弧叶浆的釜内流场特性进行了模拟对比。结果表明:当 $N=110$ r/min 时,釜内流场速度分布相对均匀,釜内高速区集中在桨叶附近;桨间距的提升会影响上下桨叶之间的相互配合效果;当 $C_2=0.27h$ (h 为搅拌釜液面高度)时,桨叶之间连接流稳定,釜内的整体混合能力显著增强; C_1 对近液面区域及釜底区域的混合效果影响较大,当 $C_1=0.29h$ 时,釜内低速区面积大幅减少;双层折流板三弧叶浆的折流板限制了其径向推流能力,但轴向推流能力得到了显著增强。研究结果可为双层折流板三弧叶浆在实际工业中的应用提供参考。

关键词:搅拌槽;双层折流板三弧叶浆;搅拌釜;PIV;CFD

中图分类号:TF803.2;TQ051.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2025)02-0256-08

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2025.02.015

搅拌设备是对不同物料进行混合以促进其充分反应的关键设备,在化工行业^[1]的各工艺流程中应用十分广泛,包括反应、溶解、混合、浸出、萃取、干燥、冷却等^[2]。其搅拌性能直接影响产品质量、生产效率和成本控制,因此研究搅拌釜内流场特性对改善搅拌性能具有重要意义^[3-4]。

粒子图像测速技术(PIV)是一种无接触式流动测量技术,基于图形图像处理原理能够实现对流场全场和瞬态测量。PIV 通过对同一瞬时的流动图像分析,可获得测试区域内整个流场的速度分布^[5-6]。计算流体力学(CFD)是计算机模拟的一种重要手段,能很好地预测流场特性^[7]。将 PIV 技术与 CFD 模拟相结合,不仅能通过试验验证模拟结果的准确性,还能利用模拟结果优化试验设计,从而提高研究效率。

轴流浆(CBY)作为典型的三弧叶浆^[8-9],适用于中低黏度流体的混合,尤其对固液悬浮混合效果更佳^[10]。此外,CBY 浆还具有低搅拌功率、强循环效果等特点^[11],使其在工业应用中具有广泛的适用性。近年来,国内对 CBY 浆的研究主要聚

焦于双层或多层组合搅拌浆系统^[12-13],多层浆搅拌体系的功率特征与多种因素有关,包括搅拌桨选型、桨间距、下层浆离底距、上层浆浸没深度和流体的流动形态等^[14-15]。为了深入研究这些因素的影响,研究人员采用数值模拟与试验相结合的方法,对 CBY 浆槽内的流场特性进行了探究;但研究方向多集中在传统三弧叶搅拌浆釜内流场特性方面,而对改进型三弧叶浆槽内流场特性研究尚未见报道。因此,试验采用 PIV 技术对双层折流板三弧叶浆的釜内流场进行研究,并将该组合浆与双层无折流板三弧叶浆槽内流场进行模拟对比分析,以期对双层折流板三弧叶浆的工程应用与优化改进提供参考。

1 试验与数值模拟方法

1.1 试验装置与方法

方槽的模型如图 1(a)所示,厚度为 25 mm,高度 $L=1\ 000$ mm,长度 $a=900$ mm 和宽度 $b=900$ mm。试验开始前,向方槽中注入清水,使方槽与搅拌釜液

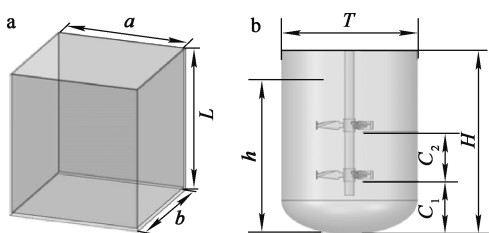
收稿日期:2024-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52175171)。

第一作者简介:卢贤俊(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为搅拌技术与装备的开发应用。

通信作者简介:周勇军(1969—),男,博士,教授,主要研究方向为搅拌技术与装备的开发应用。E-mail:zhouyj@njtech.edu.com。

面保持一致,并使 CCD 相机的拍摄方向垂直于方槽表面,以降低搅拌釜壁面反光带来的不利影响。试验用搅拌釜的筒体材质为透明树脂,筒底为标准椭圆形不锈钢封头,筒体和筒底的厚度均为 6 mm,如图 1(b)所示。搅拌釜内径 $T=430$ mm,总高度 $H=670$ mm,液面高度 $h=580$ mm,通过调节离底距 C_1 、桨间距 C_2 和搅拌转速 N ,探究在不同工况条件下双层折流板三弧叶桨槽内的流场变化。



a—透明方槽; b—搅拌釜。

图 1 搅拌槽的结构示意

Fig. 1 Schematic diagram of structure of stirring tank

试验用双层折流板三弧叶桨中的上下桨尺寸完全相同,桨叶示意及结构参数如图 2 所示。带折流板三弧叶桨由轮毂、普通弧形桨叶和折流板 3 部分组成。其中,三弧叶弧形桨叶与轮毂垂直方向的夹角 $\theta_0=45^\circ$,叶片之间的夹角 $\theta_1=120^\circ$,轮毂的高度 $h_0=40$ mm,外径 $d_0=40$ mm,内径为 $d_1=32$ mm,折流板为圆弧形,焊接于桨叶尖端的中心,长度 $l_0=50$ mm,宽度 $l_1=25$ mm,折流板与桨叶的厚度 $t_0=2$ mm,桨叶直径 $D_0=220$ mm。叶片由宽叶、窄叶和弧叶组成,其中,宽叶长度 $l_2=10$ mm,窄叶与宽叶夹角 $\theta_2=10^\circ$,窄叶长度 $l_3=55$ mm,弧叶折弯角度 $\theta_3=35^\circ$,折弯半径 $r_0=24$ mm。

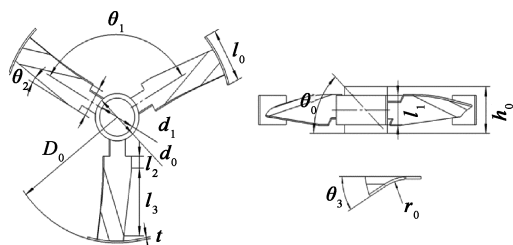


图 2 带折流板三弧叶桨

Fig. 2 Triple-arc-blade impeller with baffle

试验采用粒子图像测速试验平台进行研究。PIV 试验平台主要由搅拌控制装置和粒子图像测

速装置(美国 TSI 公司的制造产品)组成,粒子图像测速技术如图 3 所示。

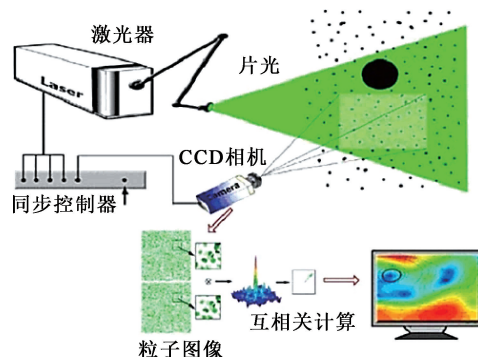


图 3 粒子图像测速技术

Fig. 3 Particle image velocimetry

试验选择密度 $1\ 198.1\ \text{kg/m}^3$ 、黏度 $30\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ 的甘油-水溶液作为搅拌介质。首先将清水注入方槽直至方槽与搅拌釜的液面保持一致;然后根据多次少放的原则向搅拌釜内加入粒径为 $50\ \mu\text{m}$ 示踪粒子,以便粒子能够均匀分布,避免局部浓度过高或过低;同时,为了确保粒子成像的质量,在搅拌桨叶和搅拌轴表面均匀喷上黑色哑光喷漆,以防止激光照射其表面时产生反光影响粒子成像效果;之后根据转速、离底距、桨间距设置不同的试验工况,在满足所有试验要求后,开始连续拍摄,每一工况拍摄 200 组照片,以确保能准确获取整个流场的平均速度分布;拍摄完成后,提取图像,在 Insight4G 中进行预处理和后处理,目的是提升图像质量和数据准确性,最后利用 Tecplot 软件对处理后的图像进一步分析与处理,得到试验所需的速度云图。

1.2 网格划分与网格无关性验证

为了保证模拟结果的准确性,同时尽可能减小网格数量,采用 ANSYS 2022 R1 中的 Fluent Meshing 组件对桨叶附近的动区域面网格进行加密,并在边界处添加 3 层边界层,模型的面网格和体网格如图 4 所示。在模拟计算中,选择 RNG $k-\epsilon$ 模型进行瞬态计算,使用多重参考系法对静区域和动区域进行设置。试验选择增加网格数量后的功率变化量作为变量进行网格无关性验证,在控制 $N=130\ \text{r/min}$ 、 $C_1=0.29h$ (h 为搅拌釜液面高度,下同)和 $C_2=0.27h$ 相同条件下,通过改变面网格的最小尺寸及动区域和静区域的网格尺寸来确定不同的网格总数,再将不同网格总数下搅拌功率进行对比。因划分

网格数量为 131 万时,增加网格数量后功率变化量小于 4%,故选择 131 万网格数量作为模拟网格数量。



图 4 模型面网格和体网格

Fig. 4 Face and volume meshes of model

1.3 计算模型

RNG $k-\epsilon$ 模型对标准 $k-\epsilon$ 模型的动力黏度系数增加一个修正项,在湍动耗散率 ϵ 的方程中增加一个项,该模型的湍动能 K 、湍动耗散率 ϵ 、湍动黏度系数 μ_t 和修正系数 $C_{\epsilon 2}^*$ 的表达式如下:

湍动能 K 的表达式为:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j K)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_K + G_b - \rho \epsilon - Y_M; \quad (1)$$

湍动能耗率 ϵ 的方程为:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} (P_K + C_{\epsilon 3} G_b) - C_{\epsilon 2}^* \rho \frac{\epsilon^2}{K}; \quad (2)$$

湍动黏度系数 μ_t 的表达式为:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}; \quad (3)$$

修正系数 $C_{\epsilon 2}^*$ 的表达式为:

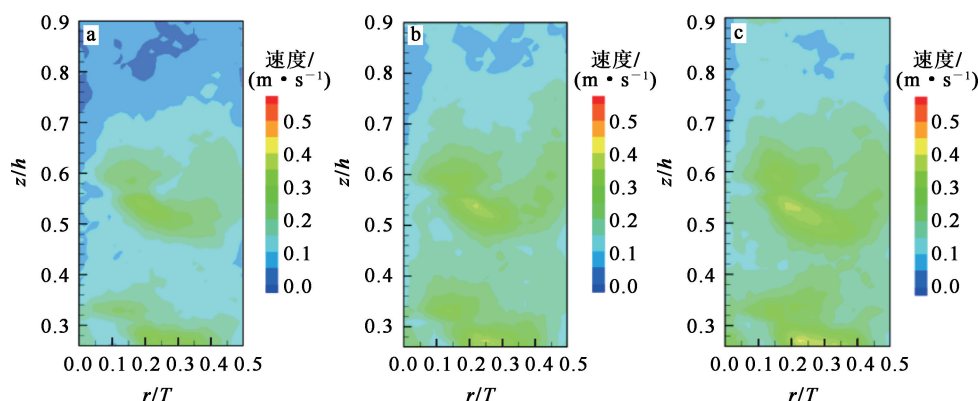
$$C_{\epsilon 2}^* = C_{\epsilon 2} + \frac{C_{\mu 0} \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3}. \quad (4)$$

模型方程中经验常数的典型取值为: $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_\epsilon = 1.39$, $C_{\epsilon 1} = 1.42$, $C_{\epsilon 2} = 1.68$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 转速对釜内流场的影响

图 5 为不同转速下釜内的速度云图。 z/h 为轴向无因次化位置, r/T 为径向无因次化位置。由图 5(a) 看出: 当 $N=90$ r/min 时, 近液面 $0.7 < z/h < 0.9$ 区域及近轴 $0 < r/T < 0.1$ 区域出现面积较大的低速区; 上下桨的高速区之间速度断层, 导致釜内整体的轴向混合效果大幅降低。由图 5(b) 看出: 当 $N=110$ r/min 时, 低速区面积大量减小, 近液面 $0.4 < z/h < 0.5$ 、 $0.6 < z/h < 0.7$ 区域的流体速度均明显加快; 但近液面 $0.8 < z/h < 0.9$ 区域仍存在部分低速区, 这是由于近液面处的流体主要来自上桨叶的卷吸作用及壁面回流, 说明转速增大对近液面区域流体速度的影响有限。由图 5(c) 看出: 当 $N=130$ r/min 时, 近液面 $0.4 < z/h < 0.5$ 区域形成了稳定的高速循环流, 上下桨叶的高速区面积无明显变化; 转速的进一步增大并未使近液面 $0.8 < z/h < 0.9$ 区域低速区面积明显减小。综上分析可知, 当 $N=110$ r/min 时, 混合效率最佳。



a— $N=90$ r/min; b— $N=110$ r/min; c— $N=130$ r/min。

图 5 不同转速下的釜内速度云图

Fig. 5 Velocity contours in tank at different rotating speed

2.2 离底距对釜内流场的影响

图 6 为不同离底距下釜内的速度云图。由图 6(a)

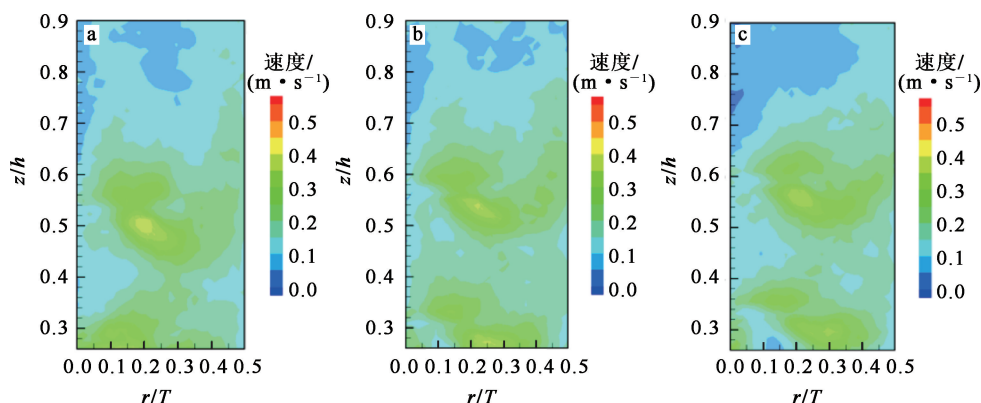
看出: $C_1 = 0.26h$ 时, 近液面 $0.8 < z/h < 0.9$ 区域低速区主要分为近轴径向位置 $0 < r/T < 0.1$

区域和中部 $0.2 < r/T < 0.3$ 两部分,由于上桨叶斜向下的推流作用明显,上下桨叶高速区之间 $0.3 < z/h < 0.4$ 区域形成了明显的高速连接带。由图 6(b)看出: $C_1 = 0.29h$ 时,近液面 $0.8 < z/h < 0.9$ 区域的低速区改善不明显;在下桨叶的卷吸作用下,上桨叶与下桨叶之间 $0.3 < z/h < 0.4$ 区域的流速明显加快;但壁面回流与 $C_1 = 0.26h$ 相比有所减弱,导致近壁面径向 $0.4 < r/T < 0.5$ 位置的近液面 $0.8 < z/h < 0.9$ 区域流速显著降低。由图 6(c)看出:当 $C_1 = 0.32h$ 时,离底距的进一步增大使釜底径向 $0.1 < r/T < 0.2$ 位置开始出现低速区,使搅拌釜底部的混合效果减弱,近液面区域的低速区面积与 $C_1 = 0.29h$ 相比有所增加。综上分析可知,当 $C_1 = 0.29h$ 时,釜内流体的整体流动情况最好。

2.3 桨间距对釜内流场的影响

图 7 为不同桨间距下釜内的速度云图。由图 7(a)

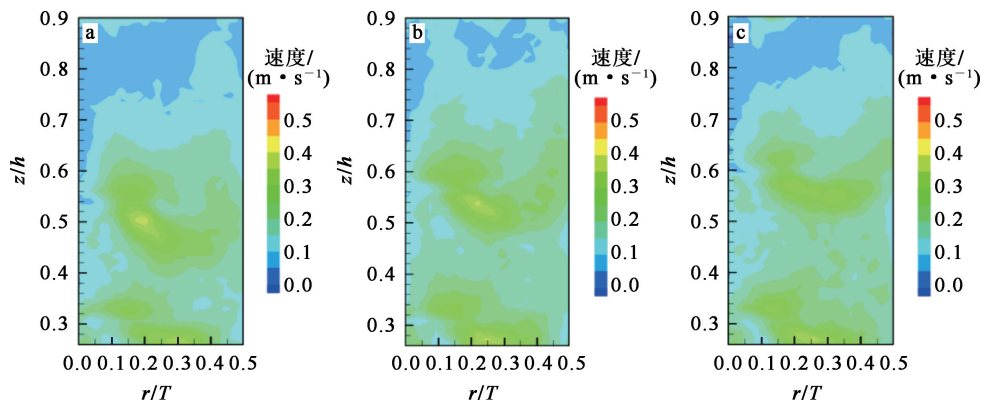
看出: $C_2 = 0.24h$ 时,近液面 $0.6 < z/h < 0.7$ 区域出现连续的低速区;由于上下桨叶位置整体偏低,近轴 $0.7 < z/h < 0.9$ 区域也出现大面积的低速区,易导致物料堆积与悬浮;近液面区域径向 $0.35 < r/T < 0.45$ 处的流体速度相对较高,该区域不易产生悬浮物。由图 7(b)看出: $C_2 = 0.27h$ 时,近液面 $0.7 < z/h < 0.9$ 区域及近轴 $0.6 < z/h < 0.7$ 区域的低速区面积减小,说明桨间距增大使上桨叶的高速区上移,同时使下桨叶的高速区面积扩大 20%。由图 7(c)看出: $C_2 = 0.30h$ 时,近液面 $0.7 < z/h < 0.9$ 区域的低速区面积相比 $C_2 = 0.27h$ 时的明显增大;由于桨间距增大,使近液面 $0.4 < z/h < 0.5$ 区域出现面积较小的高速区,但该区域的径向 $0 < r/T < 0.1$ 区域的流体速度相比 $C_2 = 0.27h$ 时有所下降,对该区域的物料混合产生不利影响。综上分析可知,最佳桨间距为 $C_2 = 0.27h$ 。



a— $C_1 = 0.26h$; b— $C_1 = 0.29h$; c— $C_1 = 0.32h$ 。

图 6 不同离底距下的釜内速度云图

Fig. 6 Velocity contours in tank at different installation heights



a— $C_2 = 0.24h$; b— $C_2 = 0.27h$; c— $C_2 = 0.30h$ 。

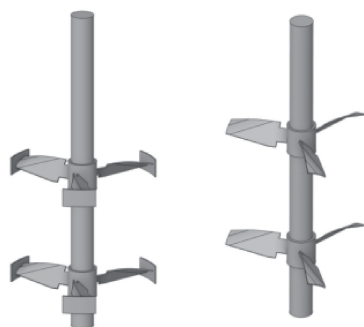
图 7 不同桨间距下的釜内速度云图

Fig. 7 Velocity contours in tank at different impeller spacings

3 数值模拟结果与分析

3.1 2 种组合浆搅拌釜内流场的对比分析

2 种组合浆双层无折流板三弧叶浆、双层折流板三弧叶浆的桨叶模型结构如图 8 所示。



双层折流板三弧叶浆 双层无折流板三弧叶浆

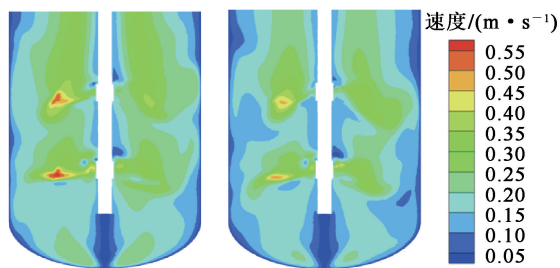
图 8 2 种桨叶的模型结构

Fig. 8 Model structure of two impellers

由图 8 看出:与双层折流板三弧叶浆相比,双层无折流板三弧叶浆仅卸下了桨叶尖端处的折流板,其余尺寸参数一致。因此,依据原双层无折流板三弧叶浆在混合时间和流场特性等情况下选取的最佳工况,选取 $N = 90 \text{ r/min}$ 、 $C_1 = 0.32h$ 、 $C_2 = 0.30h$,并在该工况下对双层折流板三弧叶浆和双层无折流板三弧叶浆进行数值模拟对比。

3.1.1 速度云图

图 9 为 2 种组合浆釜内的速度云图。从整体来看,双层折流板三弧叶浆和双层无折流板三弧叶浆都表现出轴流浆的特性,高速区集中在桨叶附近并向轴向扩散,转速较低导致椭圆形封头与圆柱筒壁的连接处出现大面积的低速区。



双层折流板三弧叶浆 双层无折流板三弧叶浆

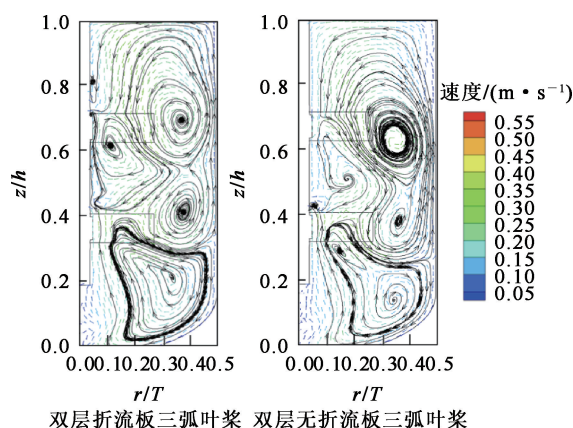
图 9 2 种桨叶的速度云图

Fig. 9 Velocity contours of two impellers

将 2 种组合浆釜内的的速度云图进行对比可知:折流板使桨叶尖端处的流速明显加快,但由于折流板会减弱径向推流作用,导致高速区的径向面积没有明显增加;由于轴向推流增强,使上下桨叶的高速区之间形成明显的连接流,改善了釜内整体的流体循环;折流板使釜底低速区的面积显著减小,进而缩短了整个釜内的搅拌混合时间。综上分析可知,折流板使搅拌釜内流速分布更佳。

3.1.2 流型图

图 10 为 2 种组合浆的釜内流型图。从整体来看,不同组合浆的上下桨叶处都出现了互相影响的高速涡旋,釜底 $0.4 < z/h < 0.6$ 区间的流体均出现顺时针涡旋, $0 < z/h < 0.32$ 区域在下桨叶的向下排出作用下,都形成了大面积的顺时针涡旋,不同组合浆的釜内循环流动均由这 4 个涡旋组成。与双层无折流板三弧叶浆相比,双层折流板三弧叶浆折流板增强了其轴向推流作用,釜底 $0.4 < z/h < 0.6$ 区间的顺时针涡旋向上桨叶靠近,使得该区间的流速明显提高;由于下桨叶的排出作用增强,双层折流板三弧叶浆的釜底形成了大循环流场,而双层无折流板三弧叶浆的釜底出现了 2 个涡旋,釜底的速度进一步降低,使得釜底的物料混合更易出现沉积现象。故在桨叶尾部加装折流板能够优化流场结构,在釜底形成大循环,加强釜内流体的循环能力。



双层折流板三弧叶浆 双层无折流板三弧叶浆

图 10 2 种桨叶的流型图

Fig. 10 Flow pattern diagrams of two impellers

3.1.3 湍动能云图

图 11 为 2 种组合浆釜内的湍动能云图。从

整体来看,湍动能的变化规律与流体速度相似,双层折流板三弧叶桨和双层无折流板三弧叶桨的桨叶处湍动能较高,且主要从轴向传递给整个流场,釜壁及釜底的湍动能整体处于较低水平。对比双层折流板三弧叶桨和双层无折流板三弧叶桨的速度云图可知:折流板限制了上桨叶湍动能的径向传递,但使上桨叶与下桨叶轴向区域的湍动能显著增大,提高了液面处及釜底的湍动能平均水平。综上分析可知,折流板的设置对流体湍动能分布有显著影响,提高了釜内整体湍动能的分布均匀性。

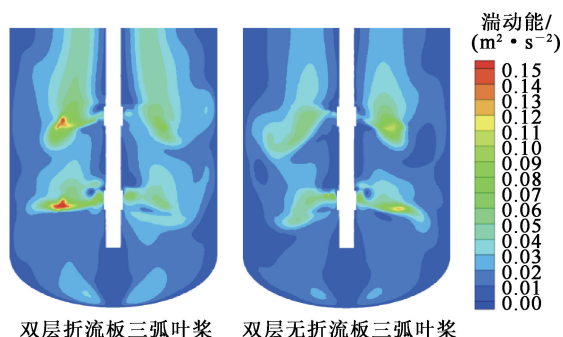


图 11 2 种桨叶的湍动能云图
Fig. 11 Turbulent kinetic energy contours of two impellers

3.2 模拟与试验的对比分析

在 $C_1=0.29h$ 、 $C_2=0.27h$ 、 $N=110$ r/min 最佳工况下,对数值模拟和 PIV 试验的流型图进行对比分析,结果如图 12 所示。可以看出:PIV 试验和数值模拟的上下桨叶处均出现了高速涡旋,位置和大小也几乎一致,在 $0.5 < z/h < 0.8$ 区域的模拟与 PIV 试验具有很好的一致性;PIV 试验和数值模拟中 $0.46 < r/T < 0.50$ 处的流体都呈现出沿壁面向上的流动方向;由于上下桨叶均为斜叶桨,PIV 试验和数值模拟中 $z/h=0.5$ 和 $z/h=0.3$ 处的流体受到明显的斜向下的推流作用,该处的流型也呈现出斜向下方向;在 $r/T=0.13$ 处的 $0.3 < z/h < 0.4$ 区域,PIV 试验中的流体沿垂直向下的方向流动,但数值模拟中的流体在 $z/h < 0.35$ 处出现分流,一部分与 PIV 试验中相同,沿垂直向下的方向流动,另一部分则回流到近轴区域。综上分析可知,PIV 试验与数值模拟的流型图吻合度较高,故说明数值模拟能够对搅拌釜内的流场进行准确预测。

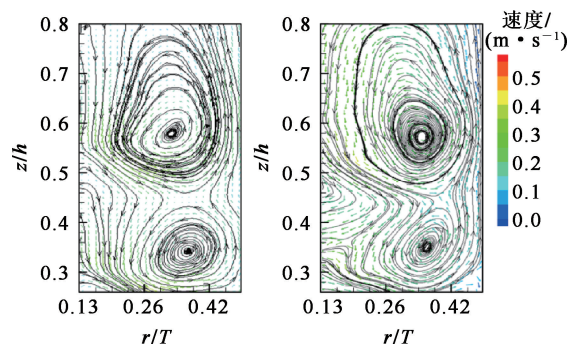


图 12 相同工况下的流型图
Fig. 12 Flow patterns diagrams under same operating conditions

4 结论

对双层折流板三弧叶桨釜内流场进行了试验研究,并验证了数值模拟的可靠性,将该组合桨和双层无折流板三弧叶桨的釜内流场特征进行了对比研究,得到的主要结论如下:

1)最佳转速为 $N=110$ r/min,此时折流板的轴向推流作用增强,釜内的高速区集中在桨叶附近,釜内流体速度得到明显改善。当离底距 $C_1=0.29h$ 时,釜底没有出现低速区,上桨叶的推流作用能够对近液面区域产生有效影响,釜内整体的低速区有所减小,促进了釜内的介质混合。

2)合适的桨间距能有效提高上下桨叶之间的相互配合效果,改善釜内整体的循环流动。当桨间距 $C_2=0.27h$ 时,近液面低速区的面积显著减少,桨叶之间的速度分布合理,此时釜内混合效率最高。

3)对比 2 种组合桨的研究结果,双层折流板三弧叶桨上下桨叶之间的流型得到改善,有利于该釜内整体的循环流动。折流板优化了釜内湍流能量的分布情况,促进了液面与釜底区域的湍动能的提升。该组合桨釜内数值模拟与试验流型图吻合度较高。

4)加装折流板能够加强流体轴向推力,加快釜底流体速度,这对于提高湿法浸出等反应的效率具有一定意义。对比其他文献研究结果可知,该桨结合了折流板与三弧叶二者的特点,通过进一步优化流场特性,可提升该组合桨推进效率和混合效果。受限于试验条件,未对双层折流板三

弧叶桨的实际釜内混合时间进行相关试验,后续有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王乐平,朱玉梅,马娟.化工设备与机械[M].北京:北京工业大学出版社,2019.
- [2] 王凯,虞军.搅拌设备[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [3] 赵洪亮,殷攀,张立峰.高固含固液搅拌槽内颗粒悬浮与混合特性[J].工程科学学报,2017,39(1):54-60.
ZHAO Hongliang, YIN Pan, ZHANG Lifeng. Particle suspension and mixing characteristics in a solid-liquid stirred tank with high solid content[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(1): 54-60.
- [4] 赵秋月,张延安,刘燕,等.搅拌对箱式混合澄清槽流动性能的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2012,33(4):559-562.
ZHAO Qiuyue, ZHANG Yan'an, LIU Yan, et al. Effect of stirring on flow characteristic of box-type mixing/clarifying tank[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(4): 559-562.
- [5] 杨斌,高凯,淡勇,等.化工搅拌釜内流动测量技术的应用进展[J].化工进展,2012,31(11):2364-2372.
YANG Bin, GAO Kai, DAN Yong, et al. Development of the flow measurement techniques used in the experimental study of the chemical stirred tank[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(11): 2364-2372.
- [6] ZHOU Y J, WANG L, HE H, et al. Mixing process in a tank stirred with improved double intermig impellers[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2019, 52(9): 719-729.
- [7] 李波,张庆文,洪厚胜,等.搅拌反应器中计算流体力学数值模拟的影响因素研究进展[J].化工进展,2009,28(1):7-12.
LI Bo, ZHANG Qingwen, HON Housheng, et al. Several factors of CFD numerical simulation in stirred tank[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(1): 7-12.
- [8] 刘心洪,郭欣,高正明. CBY 桨搅拌槽内湍流结构的研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2010,37(5):5-9.
LIU Xinhong, GUO Xin, GAO Zhengming. Investigation of turbulence structure in a CBY impeller stirred tank[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2010, 37(5): 5-9.
- [9] 郭欣. 双层 CBY 桨搅拌槽内流动特性的 PIV 研究[D].北京:北京化工大学,2010.
- [10] 梁智清. 具有粘性流体的搅拌槽中上浮与下沉颗粒分散的实验与数值模拟[D].北京:北京化工大学,2020.
- [11] 黄雄斌,王英琛,林猛流,等.轴流式搅拌器:CN2149242Y[P].1993-12-15.
- [12] MIN J, GAO Z M, SHI L T, et al. CFD simulation of mixing in a stirred tank with multiple hydrofoil impellers[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005(5): 13-18.
- [13] 郑国军,李志鹏,曲博林,等.采用粒子图像测速技术对低雷诺数下双层 CBY 桨搅拌槽内流场的研究[J].石油化工,2011,40(1):60-64.
ZHENG Guojun, LI Zhipeng, QU Bolin, et al. Investigation of flow fields in an agitated vessel with dual CBY impellers using particle image velocimetry under low Reynolds number[J]. Petrochemical Technology, 2011, 40(1): 60-64.
- [14] 庞臻. 多层桨搅拌槽内过渡区流动特性的研究[D].北京:北京化工大学,2019.
- [15] 陈帅,周勇军,林伟振,等.改进型三斜叶-Rushton 组合桨槽内流场特性研究[J].高校化学工程学报,2021,35(3):455-463.
CHEN Shuai, ZHOU Yongjun, LIN Weizhen, et al. Flow field characteristics in a stirred tank with improved three-pitched blade-Rushton combined impellers[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2021, 35(3): 455-463.

Characteristics of Flow Field in a Double-layer Three-arc Blade Propeller Kettle with Baffle

LU Xianjun¹, XU Jiabao¹, XU Ziqiang¹, TAO Lanlan², ZHOU Yongjun¹

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. National Quality Supervision & Inspection Center of Chemical Equipment, Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Suzhou 215600, China)

Abstract: The effects of the changes of speed (N), distance (C_1) from the bottom and pitch (C_2) of the double-layer baffle three-arc blade composite paddle on the flow field in the stirring tank using particle image velocimetry (PIV) were studied. The flow field characteristics of the double-layer baffle three-arc blade propeller and the double-layer baffle-free three-arc blade propeller were simulated and compared. The results show that when the rotation speed $N = 110$ r/min, the velocity distribution of

the flow field in the kettle is relatively uniform, and the high-speed zone in the kettle is concentrated near the propellers. When $C_2 = 0.27h$ (h is the liquid level height of the stirred tank), the connection flow between the propellers is stable, and the overall mixing capacity in the kettle is significantly enhanced. When $C_1 = 0.29h$, the area of the low-velocity zone in the kettle is greatly reduced. The baffle of the double-layer baffle three-arc blade propeller limits its radial pushing capacity, but the axial pushing capacity is significantly enhanced. The research results can provide a reference for the application of double-layer baffle three-arc blade propeller in practical industry.

Key words: stirred tank; double-deck three-arc blade paddle with baffle; stirring kettle; PIV; CFD