

研究论文

# 带有新型内外组合桨的搅拌设备内 流场的数值研究

孙 会, 潘家祯

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

**摘要:** 以滑移网格法的基本思想为出发点提出了滑移周期的概念. 利用滑移网格法计算了以一定转速比反向旋转的新型内外组合桨搅拌的流场. 通过对双层斜叶平桨、标准锚式桨和新型内外组合桨产生的流场进行对比, 研究了搅拌设备内的宏观流动场、时均速度、速度变化率、剪切速率和轴向循环能力. 结果表明: 滑移周期概念的提出在一定程度上解决了滑移网格法计算周期长、计算成本高的问题. 采用新型内外组合桨, 加强了径向流动和轴向流动, 改善了搅拌设备近壁区的流动状况, 且对假塑性流体流动状况的改善优于牛顿流体. 新型内外组合桨的剪切水平和轴向循环能力均优于双层斜叶平桨.

**关键词:** 新型内外组合桨; 搅拌设备; 数值研究; 滑移周期

**中图分类号:** O 357.1; TQ 027.2; TQ 018 **文献标识码:** A **文章编号:** 0438-1157 (2006) 01-0013-08

## Numerical investigation of flow fields in stirred vessels with novel combined inner and outer agitators

SUN Hui, PAN Jiazhen

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** Based on the basic principle of sliding grid method, a new concept of sliding period was proposed and used to simulate the flow fields in stirred vessels with novel combined inner and outer agitators which are rotating in opposite directions. This work was compared with dual pitched paddles and anchor agitator. The velocity fields, mean velocity components, rates of velocity change, shear rates and axial circulation capability were analyzed. The results showed that the use of the concept of sliding period could reduce the CPU time to a certain degree. By using the novel combined inner and outer agitators, the radial and axial flows were strengthened. The combined inner and outer agitators could improve the flow fields near the vessel wall, and work better for pseudo-plastic fluid than Newtonian fluid. In addition, the shear strength and axial circulation capability of combined inner and outer agitators were higher than dual pitched paddles.

**Key words:** novel combined inner and outer agitators; stirred vessels; numerical investigation; sliding period

### 引 言

计算流体力学 (computational fluid dynamics,

简写 CFD) 在工业中的逐步应用推动着搅拌设备的进一步发展. 然而从文献报道来看, 目前搅拌设备的数值研究存在两个问题: 一方面滑移网格法<sup>[1]</sup>

2004-12-20 收到初稿, 2005-03-03 收到修改稿.

**联系人:** 潘家祯. **第一作者:** 孙会 (1974-), 女, 博士研究生.

**Received date:** 2004-12-20.

**Corresponding author:** Prof. PAN Jiazhen. **E-mail:** jzpan@ecust.edu.cn

由于可以模拟搅拌桨叶和挡板间的相互作用而受到研究人员的关注,但是该方法计算周期长、计算成本高,这在很大程度上限制了它的广泛应用;另一方面涉及的桨型仅局限于传统的六叶涡轮<sup>[2, 3]</sup>、轴流桨<sup>[4]</sup>等单一桨型. 对于中高黏流体,为了在整个搅拌设备内获得良好的混合和传热效果,常常需要使用组合桨. 而目前国内外对组合桨的研究较少<sup>[2]</sup>,对内外组合桨的数值分析未见相关文献报道.

基于上述考虑,本文以滑移网格法的基本思想为出发点,通过滑移周期概念的定义,试图寻求降低滑移网格法计算成本的有效途径. 利用滑移网格法对带有新型内外组合桨的搅拌设备内的流场进行了数值研究. 为了便于比较,同时计算了只有内桨或标准锚式桨搅拌的情况. 新型内外组合桨的设计思想源于本课题组与抚顺石化公司合作项目专利<sup>[5]</sup>,内、外桨之间利用转速分配器按一定的转速比反向旋转. 通过对不同搅拌桨产生的宏观流动场、时均速度、速度变化率、剪切速率和轴向循环能力的研究,分析了带有新型内外组合桨的搅拌设备内的流动行为及流场分布特点,从而为这类桨型的进一步应用打下必要的工作基础.

## 1 滑移周期

### 1.1 滑移周期概念的提出

滑移网格法的基本思想在于合理考虑了搅拌桨叶和挡板间的相位关系差异,从而可以正确地模拟二者间流动的相干作用. 在搅拌设备 CFD 分析中,周期  $T_w$  指的是搅拌桨上的所有叶片恢复到初始位置经历的时间. 考虑到通常情况下搅拌桨具有结构对称性,因此如果忽略搅拌桨叶的个体差异,则在一个完整周期  $T_w$  内搅拌桨叶与挡板间的相位关系将重复若干次. 为此本文提出滑移周期的概念,其定义为忽略搅拌桨叶的个体差异,搅拌桨叶和挡板间的相位关系重复一次经历的时间. 由于周期  $T_w$  为滑移周期  $T_s$  的若干倍,这样在保证相同时间步长的前提下,采用滑移周期后计算的时间步数将大大减小,从而导致计算成本的降低.

### 1.2 滑移周期公式的推导

对于本文研究的内外反转组合型搅拌桨,设搅拌内桨逆时针旋转,转速  $N_i$ ,外桨顺时针旋转,转速  $N_o$ ,通常  $N_i = RN_o$ , $R$  表示内外桨的转速

比,其值为整数,则

$$T_w = \max\left\{\frac{60}{N_i}, \frac{60}{N_o}\right\} = \frac{60}{N_o} \quad (1)$$

根据滑移周期定义,经过最短时间  $T_{s1}$ ,当内桨叶片 A 的下一个叶片 B 的相位角  $\theta_{Bc}$  与外桨叶片 C 的相位角  $\theta_{Ct}$  相等时,内、外桨的相位关系与初始状态相同,参见图 1 (a);或经过最短时间  $T_{s2}$ ,当外桨叶片 C 的下一个叶片 D 的相位角  $\theta_{Dc}$  与内桨叶片 A 的相位角  $\theta_{Ac}$  相等时,内、外桨的相位关系与初始状态相同,参见图 1 (b). 滑移周期  $T_s$  则为  $T_{s1}$  与  $T_{s2}$  的最小值.

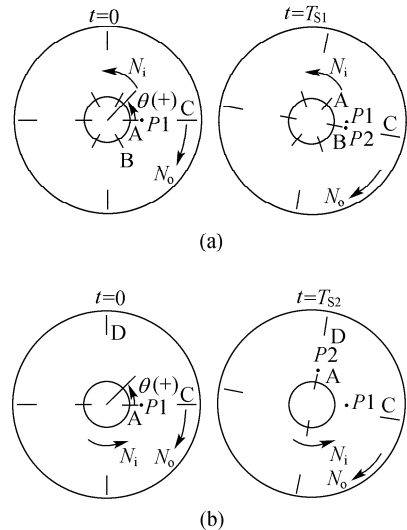


Fig. 1 Sliding period illustration for combined inner and outer agitators

设内、外桨包含的叶片数分别为  $m_i$ 、 $m_o$ , 相位角  $\theta$  逆时针方向为正, 叶片 A 初始位置的相位角  $\theta_{A0} = 0^\circ$ , 则叶片 B、C、D 的初始相位角分别为:  $\theta_{B0} = -\frac{360}{m_i}$ ,  $\theta_{C0} = 0^\circ$ ,  $\theta_{D0} = \frac{360}{m_o}$ .

对于图 1 (a) 的情况, 经过  $T_{s1}$ , 叶片 B、C 的相位角分别为

$$\theta_{Bc} = \frac{N_i}{60} \times 360 \times T_{s1} - \frac{360}{m_i} = 6N_i T_{s1} - \frac{360}{m_i} \quad (2)$$

$$\theta_{Ct} = -\frac{N_o}{60} \times 360 \times T_{s1} + 0 = -6N_o T_{s1} \quad (3)$$

$$\theta_{Bc} - \theta_{Ct} = 6N_i T_{s1} - \frac{360}{m_i} + 6N_o T_{s1} = 0 \quad (4)$$

则 
$$T_{s1} = \frac{60}{m_i(N_i + N_o)} = \frac{T_w}{m_i(R + 1)} \quad (5)$$

对于图 1 (b) 的情况, 同理可推出

$$T_{s2} = \frac{60}{m_o(N_i + N_o)} = \frac{T_w}{m_o(R + 1)} \quad (6)$$

因此内外反转组合型搅拌桨的滑移周期  $T_s$  为

$$T_s = \min \{ T_{s1}, T_{s2} \} = \min \left\{ \frac{T_w}{m_i (R+1)}, \frac{T_w}{m_o (R+1)} \right\}$$

$$= \begin{cases} \frac{T_w}{m_i (R+1)}, & \text{当 } m_i \geq m_o \\ \frac{T_w}{m_o (R+1)}, & \text{当 } m_i < m_o \end{cases} \quad (7)$$

### 1.3 流场初始效应消除与否的判定方法

采用滑移周期后，传统的判定流场初始效应是否消除的方法（如监控桨叶曳力系数）已不再适用，必须寻求新的方法判定是否获得周期性的流场。分析图 1 发现：在前后相邻两个滑移周期对应时间步内，某一指定点，如  $P1$  点相对于内、外桨叶的相位关系改变，但下一个周期  $P2$  点和前一个周期  $P1$  点相对于内、外桨叶的相位关系相同，因此可同时对  $P1$ 、 $P2$  点上的参量进行监控，当后一个周期  $P2$  点的监控量与前一个周期对应时间步的  $P1$  点的监控量差值小于指定的域值时即可认为流场的初始效应已消除。其中  $P1$  点由用户指定， $P2$  点与  $P1$  点矢径相同，但相对于  $P1$  点的相位角相差

$$\Delta\theta = -6N_o T_s + \Delta\theta_0 \quad (8)$$

式中  $\Delta\theta_0$  为初始相位差。当  $m_i \geq m_o$  时， $\Delta\theta_0 = 0^\circ$ ；当  $m_i < m_o$  时， $\Delta\theta_0 = 90^\circ$ 。

需要指出：滑移周期概念对单桨同样具有普适性。众所周知带挡板的搅拌设备配备的单桨在结构上通常都是对称的，此时可依据滑移周期的定义推导相应的计算公式，限于篇幅本文不再赘述。

## 2 搅拌设备的结构

本文研究的搅拌设备为带椭圆封头的柱形罐体，内径  $T=0.48$  m，充液高度  $H=0.32$  m。分别配备 3 种不同搅拌桨。第一种为新型内外组合桨，参见图 2。其中内桨为双层斜叶平桨，桨径  $D_i=0.275$  m，桨叶倾角  $45^\circ$ ；外桨为改进的锚式桨，桨径  $D_o=0.445$  m，桨叶倾角  $45^\circ$ ，但与内桨扭转方向相反。内、外桨上的叶片等间距安装，间距  $C=0.22$  m。第二种为双层斜叶平桨，即仅安装内桨。第三种为标准锚式桨，罐内充液高度  $H=0.26$  m，搅拌桨直径  $D=0.42$  m。

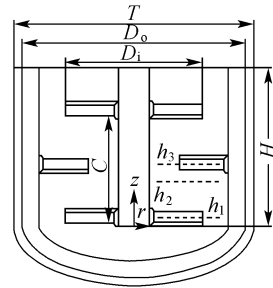


Fig. 2 Configuration of combined inner and outer agitators

工作介质的物性参数、搅拌桨转速及相应的搅拌 Reynolds 数  $Re$  见表 1。组合桨的搅拌 Reynolds 数分别按内、外桨计算。对于假塑性流体，采用 Metzner 提出的表观黏度法<sup>[6]</sup>，Metzner 常数  $k_s$  对内桨、外桨和标准锚式桨分别取 11、25、25<sup>[7]</sup>。为了使各个不同桨型计算的结果具有可比性，本文所有算例对应的  $Re$  都限定在 20 左右。由此推知罐内液体处于层流模式。

Table 1 Physical parameters of working medium, rotating speed of agitators and Reynolds numbers

Agitators & working medium	Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Viscosity / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	Rotating speed / $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	Reynolds numbers	
pitched paddles	fluid 1	1000	6.302	$N=100$	$Re=20.00$
	fluid 2	1020	$K=19.25 \text{ kg} \cdot \text{s}^{n-2} \cdot \text{m}^{-1}, n=0.623$	$N=100$	$Re=20.00$
	fluid 3	1053	$K=56.70 \text{ kg} \cdot \text{s}^{n-2} \cdot \text{m}^{-1}, n=0.469$	$N=150$	$Re=20.40$
combined agitators	fluid 1	1000	6.302	$N_i=100, N_o=-20$	$Re_i=20.00, Re_o=10.47$
	fluid 2	1020	$K=19.25 \text{ kg} \cdot \text{s}^{n-2} \cdot \text{m}^{-1}, n=0.623$	$N_i=100, N_o=-20$	$Re_i=20.00, Re_o=7.78$
	fluid 3	1053	$K=56.70 \text{ kg} \cdot \text{s}^{n-2} \cdot \text{m}^{-1}, n=0.469$	$N_i=150, N_o=-30$	$Re_i=20.40, Re_o=7.03$
anchor	fluid 1	1000	7.35	$N=50$	$Re=20.00$
	fluid 2	1020	$K=19.25 \text{ kg} \cdot \text{s}^{n-2} \cdot \text{m}^{-1}, n=0.623$	$N=45$	$Re=21.17$
	fluid 3	1053	$K=56.70 \text{ kg} \cdot \text{s}^{n-2} \cdot \text{m}^{-1}, n=0.469$	$N=66$	$Re=20.94$

### 3 搅拌设备的 CFD 分析

#### 3.1 网格划分

采用 Delaunay 三角化方法对计算域进行网格剖分。为使计算更加准确,对重要区域进行了局部网格加密。对于内外组合桨、斜叶平桨和标准锚式桨,生成的单元总数分别为 540601、198180、199413。

#### 3.2 计算模型及求解方法

搅拌设备的 CFD 分析基于质量、动量和能量守恒的 3 个基本传递方程。考虑到罐内液体处于层流模式,故方程组封闭。对于假塑性流体,以表观黏度代替牛顿流体的黏度,表观黏度采用幂律模型描述。

计算采用 FLUENT 流体计算软件。对于新型内外组合桨,采用基于非定常流场思想的滑移网格法。对于斜叶平桨和锚式桨,由于不存在挡板,本文采用旋转参考坐标系法。

方程的求解采用有限体积法,利用 Rhie-Chow 算法<sup>[8]</sup>避免发生棋盘振荡,即将相邻节点的压力值插值到网格面上的流量中,使之参与速度场的求解。选取 SIMPLE 算法耦合连续性方程和动量方程,对流项的离散使用二阶迎风差分格式。对于新型内外组合桨,滑移周期按式(7)计算。为了加快收敛速度,以各子域速度值等于其包含搅拌桨的转速对流场进行初始化,同时时间步长的设置逐渐减小。对于 3 种不同工作介质,最终设定的时间步长分别为 0.020833、0.020833、0.013889 s,对应一个滑移周期内的时间步数均为 12 步。

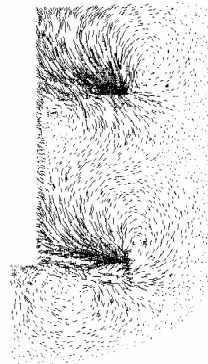
## 4 结果与讨论

#### 4.1 计算成本评估和计算结果可靠性分析

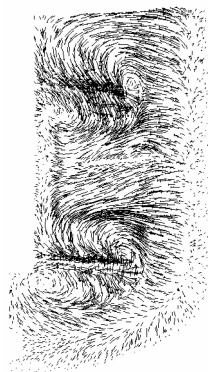
为了进一步验证滑移周期概念的可行性,本文还采用实际周期  $T_w$  考察了一个周期耗费的 CPU 机时,并与滑移周期的计算成本进行对比。为了保证二者的可比性,工作介质选取牛顿流体(流体 1),时间步长与采用滑移周期  $T_s$  时的时间步长保持一致。由于本算例中  $T_w$  为  $T_s$  的 12 倍,因此相应的时间步数为 144 步。计算结果表明:无论采用实际周期还是滑移周期,每一个时间步耗费的 CPU 机时非常接近,约为 10.08 min,相应地导致实际周期  $T_w$  计算时间为滑移周期  $T_s$  的 12 倍。对于本算例,采用滑移周期  $T_s$  共计算了 16 个周期,

合计 CPU 机时 1569 min。由此推算,若采用实际周期其计算成本将令人无法接受。因此可以说,滑移周期概念的提出在一定程度上解决了滑移网格法计算周期长、计算成本高的问题。

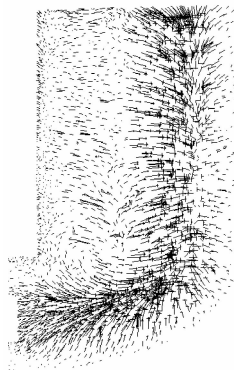
本文利用 CFD 技术对功率数进行了数值计算。当工作介质为牛顿型流体时,计算得到作用于双层斜叶平桨上的扭矩  $2.85 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,功率数 4.10;作用于锚式桨上的扭矩  $12.91 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,功率数 8.94。实验测得在本文计算条件下 ( $Re=20$ ),双层斜叶



(a) pitched paddles



(b) combined inner and outer agitators



(c) anchor

Fig. 3 Velocity vector plots in longitudinal section of different agitators

平桨功率数 4.65<sup>[9]</sup>，锚式桨功率数 8.91<sup>[10]</sup>。计算值与实验值比较吻合。上述验证了数值模拟的可靠性。

### 4.2 宏观流动场

图 3 为不同搅拌桨产生的某一纵截面的速度矢量图。工作介质为牛顿流体（流体 1），相位角位于搅拌初始状态（此时内、外桨桨叶相位关系与图 2 相同）叶片后方 10° 平面。

从图 3 可看出：标准锚式桨产生的轴向流十分微弱。双层斜叶平桨在叶片上方外侧和下方内侧各产生一个涡，但在两桨中间位置及近壁区液体流速很小，搅拌效果较差。而新型内外组合桨的流场与斜叶平桨差别较大。外桨搅拌行为的介入一方面使得桨叶上下两侧的涡心位置内移，另一方面则显著改善了罐体中间高度位置区域和近壁区的流动状况。

### 4.3 不同高度处的时均速度分布

图 4 为不同高度处 3 种不同桨型的时均速度分布。工作介质为牛顿流体（流体 1），采用高度坐标  $z$  与充液高度  $H$  的比值表示量纲 1 高度参量  $h$ ，见图 2。相位角与 4.2 相同。图中  $r$  为径向坐标，

$u_r$ 、 $u_\theta$ 、 $u_z$  分别为径向、切向、轴向时均速度分量。对于假塑性流体（流体 2、3），时均速度分布曲线与牛顿流体类似，限于篇幅本文不再列出。

从图 4 可以看出：

(1) 斜叶平桨和新型内外组合桨在径向、切向和轴向都具有较大的时均速度分量，表明这两种桨型在各个方向产生的流动都比较剧烈；而锚式桨径向和轴向时均速度较小，切向时均速度较大，这意味着标准锚式桨以切向流为主。

(2) 当切向速度  $u_\theta$  为正值时，相对于斜叶平桨，内外组合桨的切向速度受到一定削弱，且随着  $r$  的增加削弱程度随之加大；而当  $u_\theta$  为负值时，内外组合桨的切向速度较斜叶平桨得到加强，尤其在外桨桨框区域附近， $u_\theta$  增幅最为显著。另外切向速度由正转负的过渡点径向坐标  $r_{tp}$  与所处高度位置密切相关。在外桨桨叶高度（即  $h_3=0.391$ ）处  $r_{tp}$  值最小，随着距外桨桨叶竖直距离的增加， $r_{tp}$  值亦开始增加。造成上述现象的原因在于内、外桨产生的切向流方向相反，且切向速度随着距桨叶距离的增加而减小。

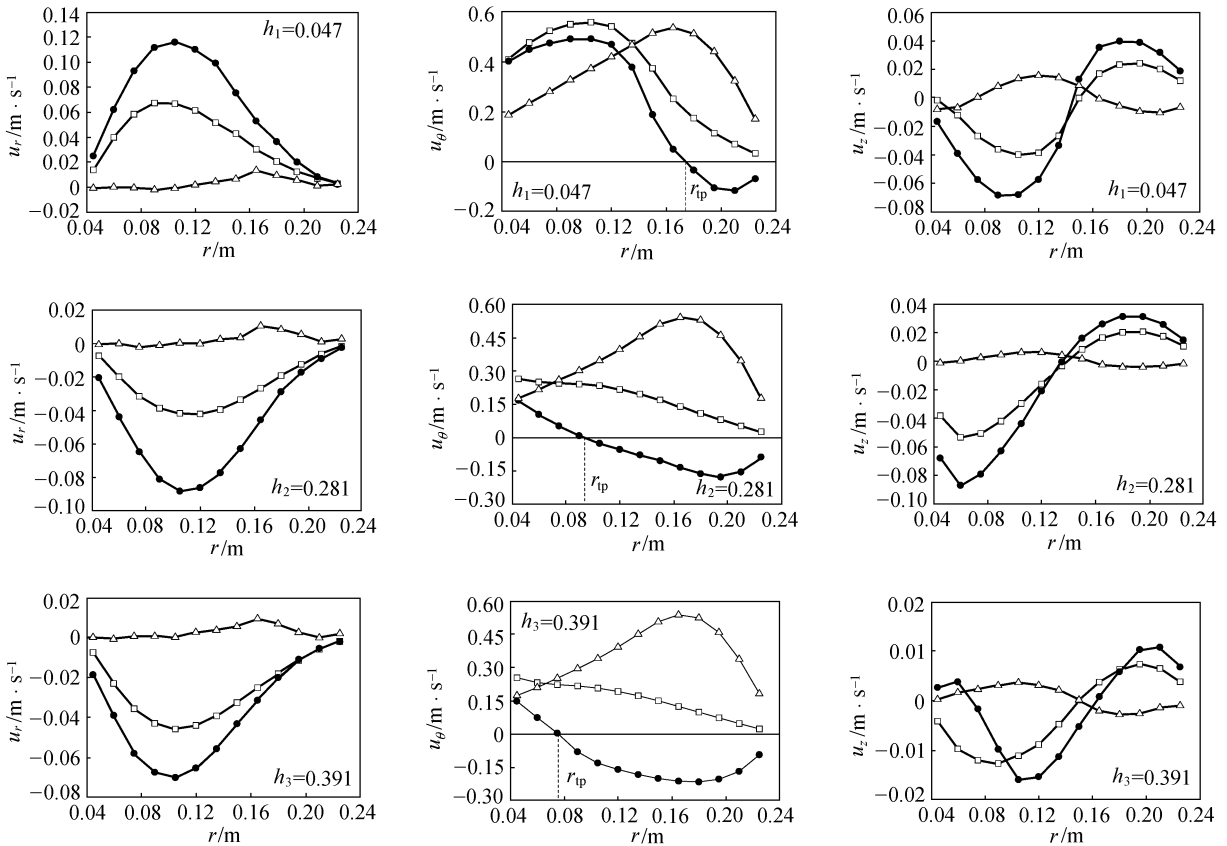


Fig. 4 Comparison of mean velocity components at different height among different agitators

□ pitched paddles; ● combined inner and outer agitators; △ anchor

(3) 相对于斜叶平桨，新型内外组合桨在搅拌设备整个高度范围内径向流动和轴向流动总体上被加强。原因在于：一方面外桨的搅拌行为引起径向流和轴向流，其作用区域主要位于外桨桨叶高度附近和近壁区，而这些区域正是单桨搅拌时搅拌作用相对较弱的区域，因此外桨搅拌行为的介入显著加强了这些区域的整体流动；另一方面外桨转速滞后于内桨，这样相对于斜叶平桨而言，在一个完整的周期  $T_w$  内，搅拌桨叶直接作用于该截面的搅拌时间大大延长，从而进一步改善了整个罐内的流动状况。

#### 4.4 不同工作介质对应的速度变化率分布

为了考察工作介质不同时，外桨搅拌行为的介入对流场造成的影响程度，本文定义了一个用于表征速度大小变化的参量：速度变化率  $\delta u$ 。

$$\delta u = \frac{|u_c| - |u_s|}{|u_s|} \quad (9)$$

式中 下角标 c 表示组合桨，s 表示双层斜叶平桨。

图 5 为不同工作介质在不同高度处对应的速度变化率对比曲线。

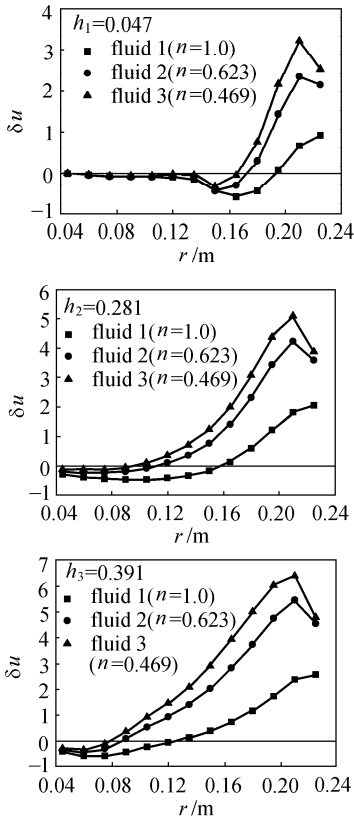


Fig. 5 Comparison of change rate of velocity magnitude at different heights among different working media

从图 5 可看出：在  $r$  值较小处，由于切向速度的减小导致内外组合桨的速度较单桨略有减小，且 3 种不同介质对应的速度变化率比较接近。但当  $r$  值较大，尤其在近壁区域，相对于斜叶平桨，内外组合桨的速度大大增加，且随着流动行为指数的减小，增幅愈加显著。这与假塑性流体的固有性质密切相关。随着流动行为指数的减小，介质表现出的假塑性增强，在相同的剪切速率增量下（关于剪切速率后文将会阐述），表观黏度的降幅增加，使得流体流动的摩擦阻力的降幅增加，从而导致流速增幅加大。

上述现象意味着：一方面外桨搅拌行为的介入使得搅拌设备靠近罐壁区域流动增强，改善了该区域的流动状况，这对于黏稠物系的混合和传热十分有利；另一方面相对于牛顿型流体，新型内外组合桨对假塑性流体流动状况的改善更为显著。

#### 4.5 不同高度处的剪切速率分布

图 6 为不同高度处 3 种不同桨型对应的剪切速率分布对比。工作介质为牛顿型流体（流体 1），

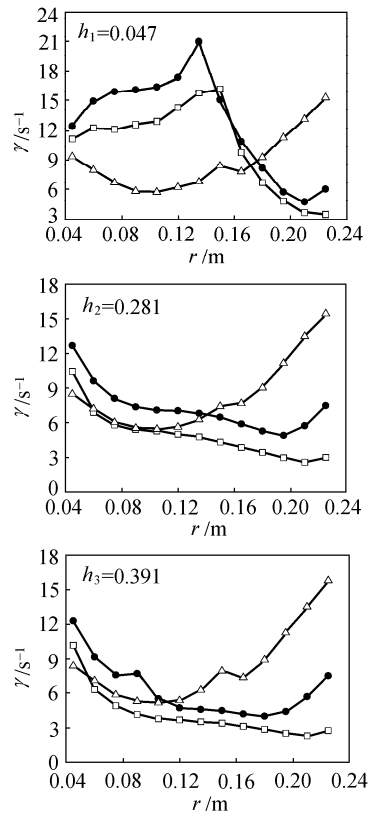


Fig. 6 Comparison of mean shear rates at different heights among different agitators

□ pitched paddles; ● combined inner and outer agitators; △ anchor

高度参量与 4.3 相同。对于假塑性流体（流体 2、3），剪切速率分布曲线与牛顿流体类似，限于篇幅本文不再列出。

对图 6 分析可知：

(1) 锚式搅拌桨属于大直径桨型，因此近壁区剪切速率较大，而中心区相对较小；而斜叶平桨和内外组合桨在罐内中心区域剪切速率较大，在近壁区相对较小。

(2) 新型内外组合桨在搅拌设备整个高度范围内的剪切速率总体上高于双层斜叶平桨，在罐内主体区增幅为 12%~85%，而在近壁区增幅最高可达 171%。这表明外桨搅拌行为的介入改善了整个搅拌设备内，尤其是近壁区的剪切水平，这对于由剪切控制的混合过程十分有益。

#### 4.6 轴向循环能力

轴向循环能力是促进混合效率的一个重要因素。考虑到泵送流量数反映了搅拌桨的循环特性，因此本文采用轴向泵送流量数  $N_{qd}$  描述不同搅拌桨的轴向循环能力。

$$N_{qd} = \frac{\int_0^{D/2} 2\pi u_z r dr}{ND^3} \quad (10)$$

表 2 为各个不同桨型对应的泵送流量数。由于锚式桨产生的轴向流十分微弱，本文对其未进行计算。

Table 2 Pumping number of different agitators

Working medium	Pitched paddles	Combined inner agitator	Combined outer agitator
fluid 1 ( $n=1.0$ )	0.23	0.29	0.26
fluid 2 ( $n=0.623$ )	0.25	0.31	0.24
fluid 3 ( $n=0.469$ )	0.26	0.31	0.24

从表 2 可看出：无论采用何种介质，新型内外组合桨的内桨产生的泵送流量数总是高于双层斜叶平桨。此外外桨上的折叶也同时产生一定的泵送流量。因此可以说，新型内外组合桨的轴向循环能力优于双层斜叶平桨。

## 5 结 论

以滑移网格法的基本思想为出发点，提出了滑移周期的概念。利用滑移网格法计算了以一定转速比反向旋转的新型内外组合桨搅拌的流场，分析了搅拌设备内的流动行为和流场分布特点，得到如下结论。

(1) 滑移周期概念的提出在一定程度上解决了滑移网格法计算周期长、计算成本高的问题。

(2) 斜叶平桨和新型内外组合桨在各个方向产生的流动都比较剧烈，而标准锚式桨以切向流为主。相对于斜叶平桨，新型内外组合桨在搅拌设备整个高度范围内径向流动和轴向流动总体上被加强。

(3) 采用新型内外组合桨改善了搅拌设备近壁区的流动状况，且对假塑性流体流动状况的改善优于牛顿流体。

(4) 标准锚式桨在近壁区剪切速率较大，中心区相对较小；而斜叶平桨和内外组合桨在罐内中心区域剪切速率较大，在近壁区相对较小。此外新型内外组合桨的剪切水平总体上高于双层斜叶平桨。

(5) 新型内外组合搅拌桨的轴向循环能力优于双层斜叶平桨。

### 符 号 说 明

- $C$ ——桨叶间距，m
- $D$ ——搅拌桨直径，m
- $H$ ——槽内充液高度，m
- $h$ ——量纲 1 高度
- $K$ ——稠度系数， $\text{kg} \cdot \text{s}^{n-2} \cdot \text{m}^{-1}$
- $k_s$ ——Metzner 常数
- $m$ ——叶片数
- $N$ ——转速， $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
- $N_{qd}$ ——轴向泵送流量数
- $n$ ——流动行为指数
- $R$ ——内外桨的转速比
- $Re$ ——搅拌 Reynolds 数
- $r$ ——径向坐标，m
- $T$ ——搅拌槽直径，m
- $T_s$ ——滑移周期，s
- $T_w$ ——搅拌桨的周期，s
- $t$ ——时间，s
- $u$ ——速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $\delta u$ ——速度变化率
- $z$ ——高度坐标，m
- $\gamma$ ——剪切速率， $\text{s}^{-1}$
- $\theta$ ——相位角， $^\circ$
- $\Delta\theta$ ——相位角差值， $^\circ$
- $\Delta\theta_0$ ——初始相位差， $^\circ$

## 下角标

- A, B, C, D——叶片代号  
 c——内外组合桨  
 i——内桨  
 o——外桨  
 $r, z, \theta$ ——坐标轴方向  
 s——双层斜叶平桨

## References

- [1] Luo J Y, Gosman A D, Issa R I, Middleton J C, Fitzgerald M K. Full flow field computation of mixing in baffled stirred vessels. *Chem. Eng. Res. Des.*, 1993, **71A**: 342-344
- [2] Brucato A, Ciofalo M, Grisafi F, Micale G. Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels; A comparison of alternative modeling approaches. *Chem. Eng. Sci.*, 1998, **53** (21): 3653-3684
- [3] Lamberto D J, Alvarez M M, Muzzio F J. Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank. *Chem. Eng. Sci.*, 1999, **54** (7): 919-942
- [4] Kelly W, Gigas B. Using CFD to predict the behavior of power law fluids near axial-flow impellers operating in the transitional flow regime. *Chem. Eng. Sci.*, 2003, **58** (10): 2141-2152
- [5] Miao Yi (苗一), Zhang Yun (张云), Pan Jiazhen (潘家祯). CN, 2528521. 2003
- [6] Metzner A B, Otto R E. Agitation of non-Newtonian fluids. *AIChE J.*, 1957, **3** (1): 3-10
- [7] Wang Kai (王凯). Flow, Mixing and Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids (非牛顿流体的流动、混合和传热). Zhejiang: Zhejiang University Press, 1988
- [8] Rhie C M, Chow W L. A numerical study of the turbulent flow past an aerofoil with trailing edge separation. *AIAA J.*, 1983, **21**: 1525-1532
- [9] Nie Qingde (聂清德). Chemical Process Equipment Design (化工设备设计). Beijing: Chemical Industry Press, 1993
- [10] Wang Jiajun (王嘉骏), Feng Lianfang (冯连芳), Gu Xueping (顾雪萍), Wang Kai (王凯). New investigation of power consumption and Metzner constant for anchor impellers. *Chem. Eng.* (化学工程), 1999, **27** (6): 20-23