

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.020

# T型搅拌器数值模拟研究

牟童<sup>a</sup>, 郑源<sup>a</sup>, 郑建坤<sup>a</sup>, 毛秀丽<sup>a</sup>, 张新<sup>a</sup>, 朱延涛<sup>b</sup>

(河海大学 a. 能源与电气学院; b. 水利水电学院, 南京 211100)

**摘要:** 针对一种新型 T 型搅拌器, 采用计算流体动力学 (CFD) 软件 FLUENT, 利用多重参考系法 (MRF) 对其的流场进行数值模拟: 首先分析对比了 T 型搅拌器与开启式涡轮搅拌器和圆盘涡轮式搅拌器的湍流强度、搅拌槽内流场特性、时均速度分布和搅拌功率, 结果表明 T 型搅拌器的流场分布较好, 能够达到更好的混合效果; 通过分析 T 型搅拌器在不同安装高度下的搅拌特性, 确定了指定搅拌槽尺寸情况下最佳安装高度为 150 mm; 最后计算了不同叶片数 T 型搅拌器的湍流强度分布和搅拌功率, 得知槽内搅拌功率随着叶片数的增加而增大, 3 叶片数的 T 型搅拌器具有最优的湍流强度分布。本研究对分析和开发类似新型搅拌器有重要的参考意义。

**关键词:** T 型搅拌器; 数值模拟; 流场特性; 搅拌功率

**中图分类号:** TQ051.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0089-06

## Numerical Simulation of T-shaped Stirrer

MOU Tong<sup>a</sup>, ZHENG Yuan<sup>a</sup>, ZHENG Jian kun<sup>a</sup>, MAO Xiu li<sup>a</sup>, ZHANG Xin<sup>a</sup>, ZHU Yan tao<sup>b</sup>

(a. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

b. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The flow field of a new T-shaped stirrer was simulated using the multiple reference frame (MRF) method in the computational fluid dynamics (CFD) software FLUENT. The intensity of turbulence, flow field characteristics, mean velocity distribution, and mixing power of the T-shaped stirrer, open turbine stirrer, and Rushton turbine stirrer were analyzed and compared, and the results suggested that the T-shaped stirrer has a better flow field distribution to achieve better mixing effects. The mixing characteristics of T-shaped stirrer with different mounting heights were analyzed, and the best mounting height was obtained as 150mm under the condition of fixed stirred tank size. The turbulence intensity and mixing power of the T-shaped stirrer with different numbers of blades were investigated, which showed that the mixing power increases with the increasing number of blades and the T-shaped stirrer with 3 blades has the best turbulence intensity distribution. The research can provide an important basis for the analysis and development of new stirrer.

**Key words:** T-shaped stirrer; numerical simulation; flow field characteristics; mixing power

搅拌设备在工业生产中应用范围很广, 尤其是在化学工业中。化学工艺过程的种种变化, 是以参加反应物质的充分混合为前提的。搅拌设备在许多场合是作为反应器来应用的。搅拌器的叶片形状对搅拌器的搅拌效果有着重大影响, 近年来, 国内外学者对轴流式搅拌器的微观混合<sup>[1-2]</sup>做了大量的研究工作, 而对于一些新型搅拌器<sup>[3]</sup>的研究和开发并不多。目前, 运用 CFD 方法<sup>[4]</sup>研究搅拌槽内的三维流动特性已经得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>; 清华大学王展等<sup>[7]</sup>进行了一种新型搅拌桨的开发, 并对 YL 搅拌桨的性能、结构、参数进行了评价; 北京化工大学李志鹏等<sup>[8]</sup>对 CBY 搅拌桨叶进行了

数值分析, 在桨叶参数实体化模型的建立、搅拌槽内流动场的数值模拟及桨叶的应力计算三方面都取得一定进展; 河海大学郑建坤等<sup>[9]</sup>对曲面型叶片轴流式搅拌器进行了数值模拟研究, 分析研究了不同扭角下曲面型搅拌器槽内流场特性和搅拌功率。

本研究借助于计算流体力学软件 FLUENT, 首先对传统的开启式涡轮搅拌器和圆盘式涡轮搅拌器进行数值模拟, 并与新型的 T 型搅拌器进行对比分析, 分别计算在相同条件下三种不同桨型搅拌器的三维流场特性和搅拌功率; 其次改变 T 型搅拌器在搅拌槽中的安装高度, 确定在指定搅拌槽尺

收稿日期: 2013-11-02    修回日期: 2014-04-28    网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.020.html>

作者简介: 牟童(1988-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事流体机械数值模拟方面研究。E-mail: mtseu@163.com

通讯作者: 郑源(1964-), 男, 山东日照人, 教授, 博士, 从事流体机械数值模拟及故障诊断研究。E-mail: zhengyuan@hhu.edu.cn

寸情况下 T 型搅拌器工作的最佳安装高度;最后对不同叶片数的 T 型搅拌浆进行数值模拟,分别计算 2 叶片、3 叶片、4 叶片和 6 叶片 T 型搅拌器搅拌槽的湍流强度和搅拌功率,并最后对模拟结果进行分析评价。

## 1 数值模拟

### 1.1 搅拌槽与搅拌浆基本尺寸

搅拌槽内径  $D = 800$  mm, 挡板个数 4, 挡板高度  $W_h = 400$  mm, 挡板宽度  $W_b = 60$  mm, 挡板厚度  $W_t = 5$  mm。搅拌槽内液面高度  $H = 600$  mm, T 型搅拌器距底面高度  $h = 20$  mm, 转速  $n = 20$  rad/s, 搅拌浆为三个 T 型叶片, 叶片安装角为  $90^\circ$ , 叶片尺寸见图 1, 叶片厚度  $t = 2$  mm, 叶轮直径  $d = 300$  mm, 工作介质为常温下的水。

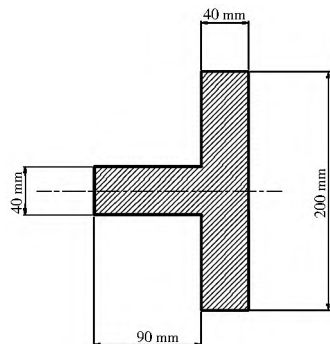


图 1 T 型搅拌器叶片形状尺寸

Fig. 1 Shape and dimension of T-shaped stirrer

### 1.2 Gambit 模型的建立及网格划分

搅拌浆的模型如图 2 所示。首先是模拟计算安装高度为 120 mm 的搅拌器,与相同叶轮半径的开启式涡轮搅拌器和圆盘式涡轮搅拌器进行对比,开启式涡轮搅拌器与圆盘式涡轮搅拌器的具体参数参照《搅拌与混合设备选用手册》<sup>[10]</sup>,搅拌器安装高度相同。开启式搅拌浆表面积  $67\,200$  mm<sup>2</sup>,圆盘式搅拌浆表面积  $68\,816$  mm<sup>2</sup>,T 型搅拌浆表面积  $69\,600$  mm<sup>2</sup>;其次是模拟叶片安装高度  $h$  分别为 120 mm、130 mm、140 mm、150 mm、160 mm 和 170 mm 的 T 型搅拌器;最后是模拟计算 2 叶片数、3 叶片数、4 叶片数和 6 叶片数的 T 型搅拌器。

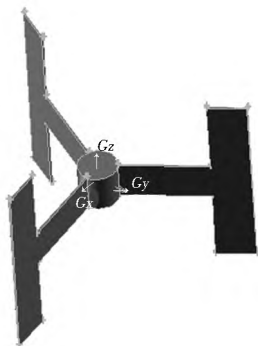


图 2 搅拌浆模型图

Fig. 2 Model of stirring rake

本研究应用前处理器 Gambit 对 T 型搅拌器和搅拌槽进行模型的建立及网格的划分。根据多重参考系法(MRF),把搅拌槽分为两个区域,即叶轮区域和叶轮外区域。两个区域

没有重叠部分,叶轮区域包括运动的搅拌浆,叶轮外区域则包括静止的挡板等部件,均采用非结构单元划分网格。非结构网格虽然给流场计算方法及编程带来一定困难,但因其适用性强,尤其针对边界复杂问题具有明显优势。在网格划分时,为了确保计算的准确性,对叶轮区域进行加密处理。为了提高叶轮外区域的网格质量,对挡板和搅拌轴的网格也进行了局部加密处理。以 T 型搅拌器安装高度  $h = 120$  mm 为例,网格总数为 641 333,其中叶轮区域网格数为 131 288,叶轮外区域网格数为 510 045。网格划分见图 3。

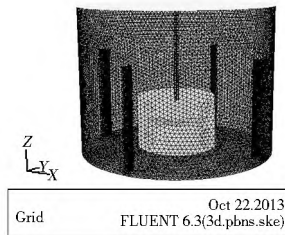


图 3 Gambit 网格划分图

Fig. 3 Mesh division of Gambit

### 1.3 边界条件设置

本研究采用多重参考系法(MRF)进行模拟,它是一种稳态算法,计算量较小。其优点是不需要实验数据便能实现对搅拌槽内流场的整体数值模拟,适用于叶轮与挡板相互作用较小的体系。模拟时,把整个计算域分为两个区域,搅拌叶轮区域内的流体设置为与搅拌浆相同的旋转速度,而叶轮外区域内的流体设置为静止的,两个区域的交界面设置为 Interface 类型,两个区域通过内外交界面进行数据能量交换,保证计算过程中内外区域之间的相互耦合。

设置自由液面为滑移壁面边界条件(Symmetry)<sup>[11]</sup>,将轴和叶轮定义为动边界(Moving Wall),所有槽体、搅拌轴、搅拌浆及挡板表面均采用无滑移壁面边界条件。其中搅拌轴处于叶轮外区域内,相对于区域内的流体是运动的;搅拌浆处于流体区域,相对于周围的流体以相同的转速运动。

### 1.4 控制方程和湍流模型

本研究采用标准  $k-\epsilon$  两方程模型。标准  $k-\epsilon$  两方程模型由 Lauder 和 Spalding<sup>[12]</sup> 在 1972 年提出,它在湍动能  $k$  的运输方程的基础上,再引入了一个关于湍动耗散率  $\epsilon$  的方程。标准  $k-\epsilon$  两方程模型在工程实践中应用广泛,但是对于弯曲壁面流动、弯曲曲线流动和强旋流,会有一定失真。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 T 型搅拌器与传统开启式、圆盘式涡轮搅拌器的对比

#### 2.1.1 湍流强度分布

当流体的雷诺数  $Re$  大于某一临界值时,流动呈无序的混乱状态,速度等特征随机变化,这种状态称为湍流。通常以雷诺数  $Re \geq 10\,000$  作为搅拌槽中液体达到湍流状态的标准。湍流强度对液体的微观混合极为重要,因为它控制着微团的尺寸。湍流强度是指湍流流动的激烈程度,它是脉动速度相对于时均速度的均方根。湍流强度与速度的脉动程度正相关,而脉动越激烈对液体的微观混合越有利。

图 4 依次显示了开启式涡轮搅拌器、圆盘式涡轮搅拌器和 T 型搅拌器搅拌槽的湍流强度情况, 三组模拟的外部条件相同, 搅拌器安装高度均为 120 mm, 搅拌桨叶轮直径均为 300 mm, 搅拌转速均为 20 r/s。从图中可以看出, T 型搅拌器搅拌槽中的湍流动能的最高值  $4.669 \times 10^{-1} \text{ J/kg}$  要高于开启式的  $3.987 \times 10^{-1} \text{ J/kg}$  和圆盘式的  $4.513 \text{ J/kg}$ 。三种搅拌器的湍流动能平均值大约在  $1.4 \times 10^{-1} \text{ J/kg}$  到  $1.8 \times 10^{-1} \text{ J/kg}$  范围内, 而在 T 型搅拌器在这个范围内的区域面积要大于开启式涡轮搅拌器和圆盘式涡轮搅拌器。由不同搅拌桨的表面参数可知, 三种搅拌器和流体的接触面积近似相等。所以在搅拌桨和流体的接触面积近似相等的情况下, T 型搅拌器搅拌槽中的湍流强度分布要优于传统的开启式涡轮搅拌器和圆盘式涡轮搅拌器。从图中还可以看出, 在搅拌器周围的区域湍流动能较大, 但在搅拌器正下方中心位置湍流动能很小。由于 T 型搅拌桨的叶片数为 3 个, 图中的截面是搅拌槽最大纵截面 YOZ 平面, 沿着其中一个叶片的横截面方向, 所以 T 型搅拌槽湍流强度的分布并不对称。

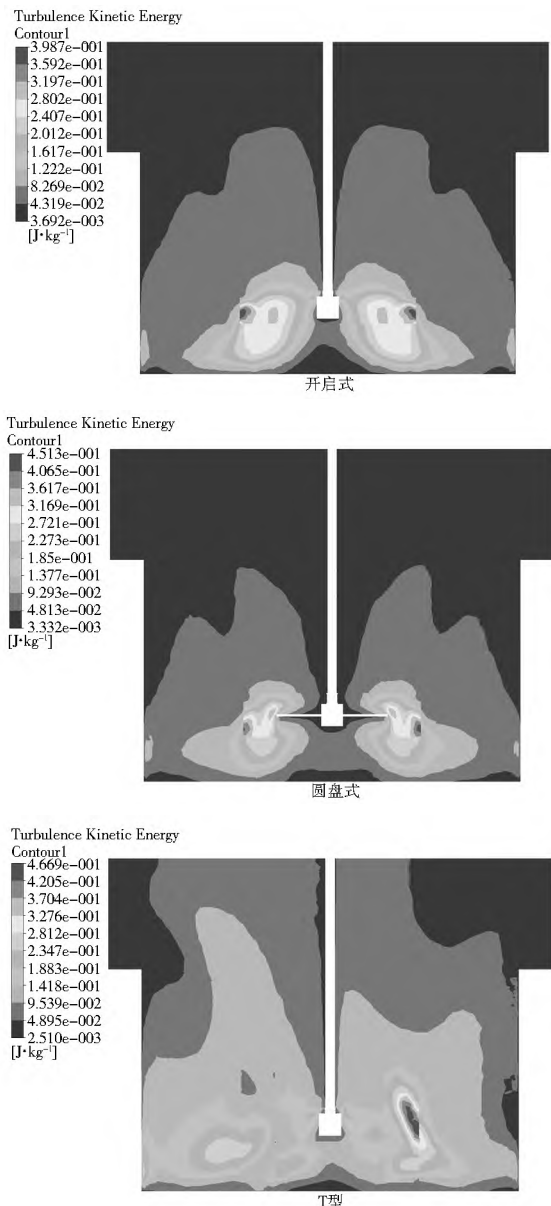


图 4 最大纵截面湍流动能

Fig. 4 Turbulence kinetic energy in the largest longitudinal section

### 2.1.2 流场分布

图 5 依次显示了开启式涡轮搅拌器、圆盘式涡轮搅拌器和 T 型搅拌器搅拌槽的流场分布情况。截面均为最大纵截面 YOZ。三种搅拌器搅拌槽内形成的流场均具有典型的“整体循环”流动形态: 流体在桨叶区加速后, 以射流形式向槽底运动, 然后下翻转向槽壁, 撞击槽壁后沿槽壁向上流动, 到达液面后再向下流回桨叶区。

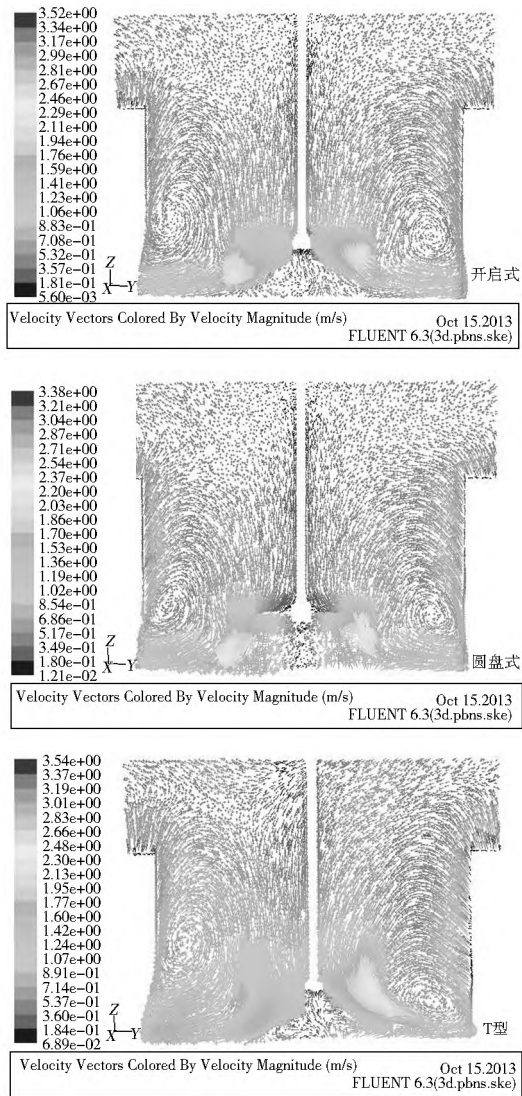


图 5 最大纵截面速度矢量

Fig. 5 Velocity vectors in the largest longitudinal section

搅拌槽中的水流流动可认为是复杂的三维不可压湍流流动, 包括沿叶轮径向的径向流、沿搅拌轴方向的轴向流和切向流。搅拌槽可分为五个区域: 近叶轮区、叶片正下方的排除区、叶轮轮毂下方的区域、槽底与槽壁交接的角区和主循环区<sup>[13]</sup>。由图 5 可知, T 型搅拌器的流场在主循环区的速度矢量要明显大于开启式涡轮搅拌器和圆盘涡轮式搅拌器, 在槽底与槽壁交接的角区, T 型搅拌器的流场速度矢量也明显要大。在三种搅拌器叶轮轮毂下方均存在一个三角形区域, 该三角形区域内的水流以搅拌轴轴心线为界形成低速循环流, 该环流是由流体经搅拌桨冲击槽底后形成的低度环流, 这种现象称为“回流现象”<sup>[14]</sup>。T 型搅拌器的三角形区域的面积要比开启式和圆盘式小, 在实际生产中该区域越小对

搅拌槽内液体的混合越有利。

综合以上三个因素, T 型搅拌器的流场分布要优于开启式涡轮搅拌器和圆盘式涡轮搅拌器, 在实际生产中能够达到更好的混合效果。

### 2.1.3 轴向速度和径向速度分布

图 6 依次显示了开启式涡轮搅拌器、圆盘式涡轮搅拌器和 T 型搅拌器流场在  $X = 0.18 \text{ m}, Y = 0, Z$  从  $-0.15 \text{ m}$  变化到  $0.45 \text{ m}$  的直线上的轴向时均绝对速度的变化。

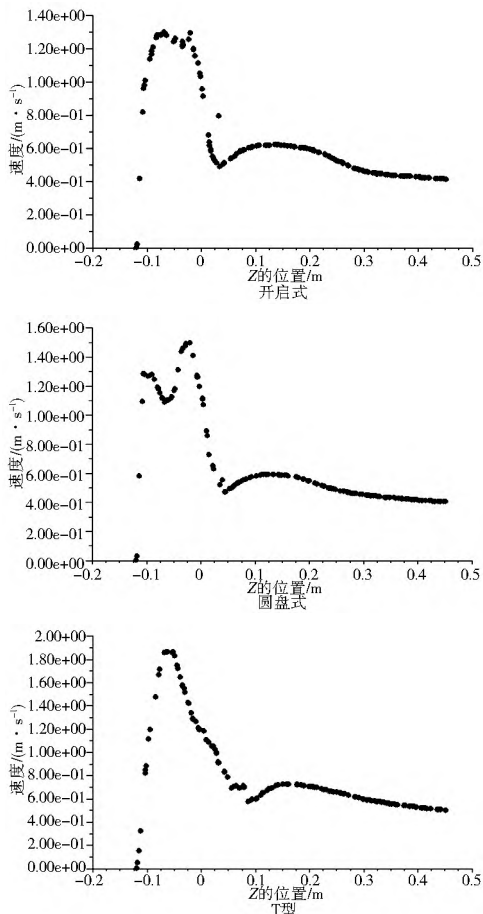


图 6 轴向时均速度散点图  
Fig. 6 Axial velocity magnitude

开启式涡轮搅拌器的最大速度出现在  $-0.04 \text{ m}$  左右, 圆盘涡轮式搅拌器的最大速度出现在  $-0.01 \text{ m}$  左右, T 型搅拌器的最大速度出现在  $-0.05$  左右。三种搅拌器的轴向时均绝对速度在搅拌桨以下的部分速度变化比较大, 而在搅拌桨以上的部分速度呈逐渐递减的趋势。T 型搅拌器的轴向时均绝对速度的最大值  $1.9 \text{ m/s}$  比开启涡轮式搅拌器的  $1.3 \text{ m/s}$  和圆盘涡轮式搅拌器的  $1.5 \text{ m/s}$  大; T 型搅拌器在  $Z$  从  $-0.15 \text{ m}$  变化到  $0.45 \text{ m}$  的近似几何平均值  $0.8 \text{ m/s}$  比开启式涡轮搅拌器的  $0.7 \text{ m/s}$  和圆盘式涡轮搅拌器的  $0.7 \text{ m/s}$  都要大, 这与流场分布的情况相符。

图 7 依次显示了开启式涡轮搅拌器、圆盘式涡轮搅拌器和 T 型搅拌器流场在  $Z = 0.13 \text{ m}, Y = 0, X$  从  $-0.3 \text{ m}$  变化到  $0.3 \text{ m}$  的直线上的径向时均绝对速度的变化。

由于 T 型搅拌器搅拌槽的流场分布不对称, 所以径向时均绝对速度也不关于  $X = 0$  对称。比较三种搅拌器的径向时均绝对速度, 也不难发现 T 型搅拌器的径向时均绝对速度的

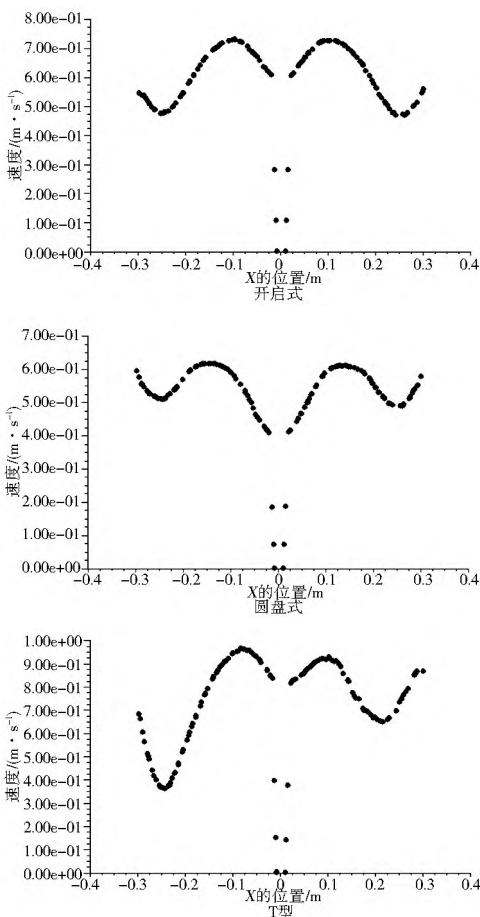


图 7 径向时均速度散点图  
Fig. 7 Radial velocity magnitude

最大值  $0.98 \text{ m/s}$  比开启涡轮式搅拌器的  $0.75 \text{ m/s}$  和圆盘涡轮式搅拌器的  $0.63 \text{ m/s}$  都要大; T 型搅拌器在  $X$  从  $-0.3 \text{ m}$  变化到  $0.3 \text{ m}$  的近似几何平均值  $0.75 \text{ m/s}$  比开启涡轮式搅拌器的  $0.65 \text{ m/s}$  和圆盘涡轮式搅拌器的  $0.56 \text{ m/s}$  都要大。这也与流场的分布情况相符。

通过对三种搅拌器的轴向时均绝对速度和径向时均绝对速度的对比, 可以认为 T 型搅拌器比开启式涡轮搅拌器和圆盘式涡轮搅拌器有着更大的轴向时均绝对速度和径向时均绝对速度, 能够达到更好的混合效果。

### 2.1.4 搅拌功率对比

搅拌功率在模拟中的近似值为:

$$P = M\omega = 2\pi N M^{1.5} \tag{1}$$

三种搅拌器的搅拌功率见表 1。对比可知, T 型搅拌器的搅拌功率要稍高于开启式涡轮搅拌器和圆盘式涡轮搅拌器。虽然 T 型搅拌器的搅拌功率稍大, 在化工生产过程中会消耗相对多一些的能源, 但是现代化工生产中在功率允许的条件下要尽可能达到更好的混合效果, 所以 T 型搅拌器还是有一定的应用潜力。

表 1 不同搅拌桨的搅拌功率

Table 1 M mixing power of different stirrers			
搅拌桨类型	开启式	圆盘式	T 型
搅拌功率/W	167.4	224.2	350.3

### 2.2 不同安装高度对 T 型搅拌器的影响

根据最初的 T 型搅拌器模型, 把搅拌器距离搅拌槽底部

的高度  $h$  依次取 120 mm、130 mm、140 mm、150 mm、160 mm 和 170 mm, 并比较计算结果, 如图 8 所示的 T 型搅拌器在不同安装高度下搅拌槽内最大纵截面  $YOZ$  的平均速度云图。

不难看出, 平均速度在搅拌桨周围最大, 靠近壁面的区

域平均速度也比较大, 有利于宏观混合。在轮毂正下方的中间区域出现了一个平均速度值很小的区域, 这是流体经搅拌桨冲击槽底后形成的低度环流, 这种现象就是前文中提到过的“回流现象”。

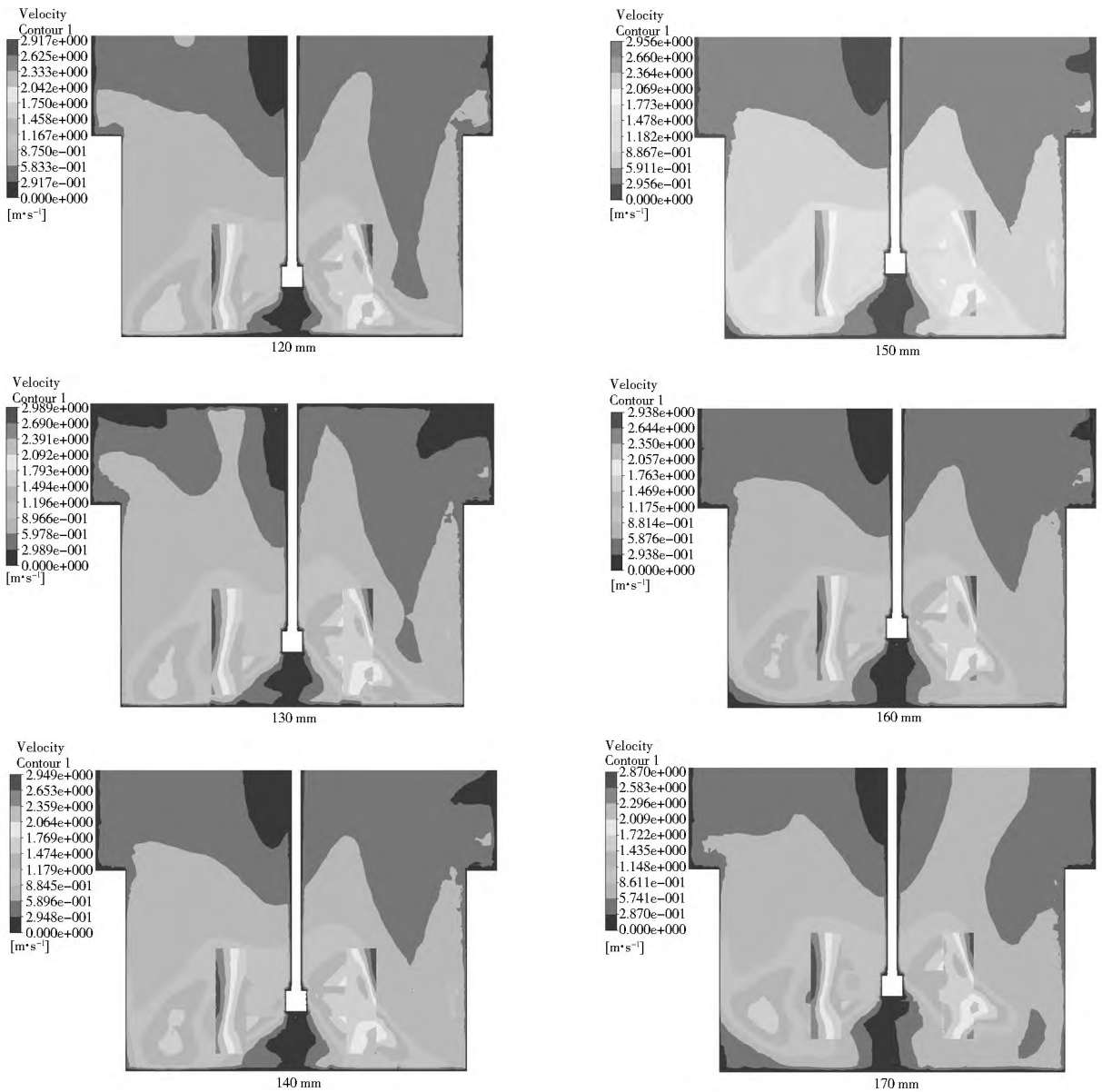


图 8 最大纵截面速度云图

Fig. 8 Velocity nephogram in the largest longitudinal section

在安装高度  $h$  从 120 mm 到 150 mm 的时候, 平均速度的最大值不变, 约为 2.95 m/s。当  $h \geq 150$  mm 时, 平均速度的最大值开始下降。随着安装高度的增加, 靠近液面附近的区域平均速度逐渐增大, 在此区域的混合效果逐渐提升; 但与此同时, 靠近槽底区域的平均速度在逐渐减小, 如果此区域的平均速度过低, 物料就会在此堆积, 起不到混合的效果。所以在保证速度分布在整个纵截面上均匀的前提下, 也要保证靠近槽底的区域达到混合需要的最低速度。当  $h \geq 150$  mm 时, 槽底区域的速度明显减小。所以当安装高度  $h = 150$  mm 时, T 型搅拌器的混合效果最好。

### 2.3 不同叶片数 T 型搅拌器性能的对比

#### 2.3.1 不同叶片数湍流强度对比

图 9 依次显示了 2 叶片、3 叶片、4 叶片和 6 叶片数 T 型

搅拌器的湍流强度分布图, 可以看出, 湍流动能最高值的最大值出现在 3 叶片数 T 型搅拌器的流场中, 湍流动能最小值的最大值出现在 6 叶片数 T 型搅拌器的流场中。另外, 3 叶片 T 型搅拌器的流场的平均湍流动能与 6 叶片数 T 型搅拌器相当, 大于其他两种叶片数的情况。在靠近槽底的区域, 6 叶片 T 型搅拌器的流场湍流强度也比其他三种叶片数的情况要大。所以整体湍流效果最好的是 3 叶片数和 6 叶片数 T 型搅拌器。

#### 2.3.2 不同叶片数搅拌功率对比

搅拌功率是衡量槽内流体搅拌程度和流动状态的重要参数, 也反映搅拌操作所需要的能量消耗, 所以在保证好的混合效果的前提下, 搅拌功率的值越小搅拌器的经济性就越好。

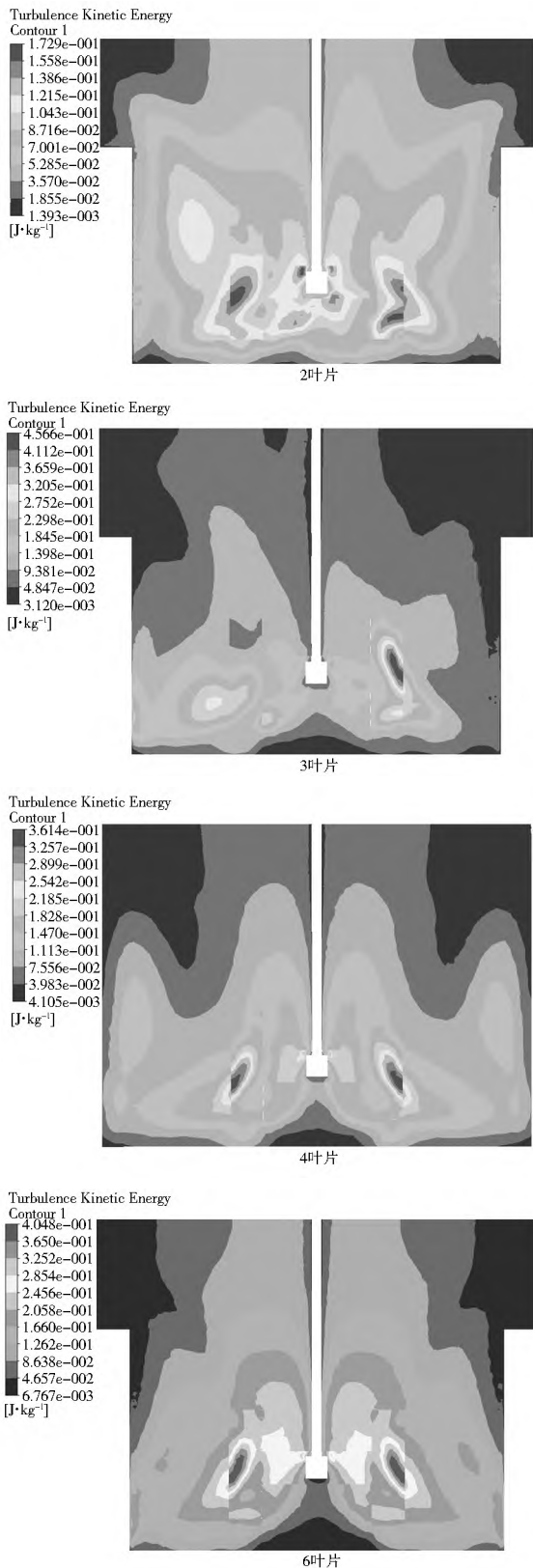


图 9 T 型搅拌器湍流动能图

Fig. 9 Turbulence kinetic energy in the largest longitudinal section of T shaped stirrer

进行数值模拟后, T 型搅拌器的搅拌功率通过公式 (1) 算出。本数值模拟中的角速度  $\omega$  统一设置为 20 r/s, 四种叶片数 T 型搅拌器的功率如图 10 所示。很显然, 随着叶片个数的增加, 搅拌器的搅拌功率逐渐变大, 且随着叶片个数的增加搅拌功率增加的幅度逐步减小。为了达到 T 型搅拌器较好的混合

效果也同时提高搅拌器的经济性, 3 叶片数的方案是最优方案。

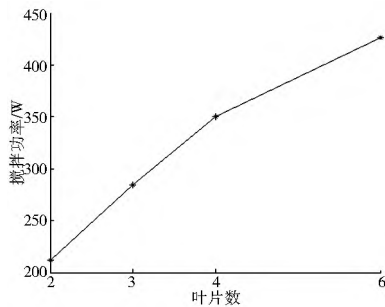


图 10 不同叶片数 T 型搅拌器搅拌功率  
Fig. 10 Mixing power of T-shaped stirrers with different numbers of blades

### 3 结论

(1) 在外部条件相同, 搅拌桨与流体的接触面积近似相等的情况下, 通过对比新型的 T 型搅拌器与开启式涡轮搅拌器、圆盘式涡轮搅拌器, 从湍流强度、速度矢量以及时均速度分布和搅拌功率四个角度分析, 认为 T 型搅拌器的流场分布要优于开启式涡轮搅拌器和圆盘式涡轮搅拌器, 能够达到更好的混合效果。

(2) 在安装高度从  $h = 120 \text{ mm}$  变化到  $170 \text{ mm}$  的范围内, 通过各安装高度下 T 型搅拌器最大纵截面的平均速度云图, 得出在搅拌槽尺寸不变的条件下, 满足固定角速度  $\omega = 20 \text{ r/s}$  的最佳安装高度为  $h = 150 \text{ mm}$ 。

(3) 在最佳安装高度  $h = 150 \text{ mm}$  的条件下, 3 叶片与 6 叶片的 T 型搅拌器的湍流强度分布效果最好。对比四种叶片数搅拌器的搅拌功率, 并考虑保证混合效果的前提下尽可能提高搅拌器的经济性, 认为 3 叶片 T 型搅拌器为最优方案。

本研究论证了新型搅拌器运用于化工搅拌的可行性和相对于传统搅拌叶片的优势, 也对新的 T 型搅拌器进行了部分参数的优化。考虑到叶片尺寸的比例也可能改变搅拌器的流场分布、时均速度和混合效果, 本研究并未完全找出 T 型搅拌器的最优工况。数值模拟的方法对 T 型搅拌器的性能和流场分析会略有误差, 需要通过后续实验过程进行进一步的验证。

### 参考文献 (References):

[1] Baldyga, Bourne J R. Turbulent mixing and chemical reactions [M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.  
 [2] 蒋勇. 搅拌槽内微观混合的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2004. (JIANG Yong. Micromixing in a Stirred Tank [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004. (in Chinese))  
 [3] 王平玲, 沈惠平. 轴流式搅拌桨的研究展望 [J]. 常州工学院学报, 2006, 19(1): 40-43. (WANG Ping ling, SHEN Hui ping. Proceeding in the Preparation of Axial flow impeller Agitator [J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2006, 19(1): 40-43. (in Chinese))  
 [4] 王嘉骏, 冯连芳. LDV 和 CFD 在流体混合中的应用进展 [J]. 化学工程, 2001, 29(4): 62-65. (WANG Jia jun, FENG Lian fang. Application Progress of LDV and CFD in the Fluid Mixing Technology [J]. Chemical Engineering, 2001, 29(4): 62-65. (in Chinese))

(下转第 175 页)

- NO Hirokazu. Comprehensive risk Management of Natural Disasters[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 26(3): 263-271. (in Chinese)
- [15] 邱蕊华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. (QIU Guir hua. Management Decision making and Application of Entropy Study[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [16] 邱东. 多指标综合评价方法的系统分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003. ( QIU Dong. Multir index Synthetic Evaluation Method of System Analysis[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [17] 张超, 万庆, 张继权. 于格网数据的洪水灾害风险评估方法——以日本新川洪灾为例[J]. 地球信息科学, 2003, 4(4): 70-72. (ZHANG Chao, WAN Qing, ZHANG Jiqian. The Method of Flood Disaster Risk Evaluation Based Upon Data of Grid Square [J]. Geo Information Science, 2003, 4(4): 70-72. (in Chinese))
- [18] Zhang Jiqian, Okada Norio, Tatano Hirokazu, Hayakawa Seiji. Damage Evaluation and Regionalization of Agrometeorological Disasters in The maizegrowing region of Songliao Plain, China: case study of Lishu Area of Jilin Province[J]. Natural Hazards, 31(1): 209-232.
- [19] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87. (WAN Xiulan BAO Yuhai. Study On The Methods of Land Use Dynamic Change Research[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 81-87. (in Chinese))
- [20] 王良健, 包浩生, 彭补拙. 基于遥感与 GIS 的区域土地利用变化的动态监测与预测研究[J]. 经济地理, 2000, 20(2): 47-50. (WANG Lingjian, BAO Haosheng, PENG Buzhuo. The Dynamic Monitoring And Prediction of The Regional Land Use Change Based on Rs And GIS[J]. Economic Geography, 2000, 20(2): 47-50. (in Chinese))
- [21] 陈育峰. 我国旱涝空间型的马尔科夫概型分析[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(2): 66-72. (CHEN Yufeng. Analysis On Spatial Types of Flood/Drought Disasters In China[J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 4(2): 66-72. (in Chinese))
- [22] 罗积玉, 邢英. 经济统计分析方法及预测[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987: 335-336. ( LUO Jiyu, XING Ying. Economic statistical methods of analysis and prediction[M]. Peking: Tsinghua University Press, 1987: 335-336. (in Chinese))
- [23] 刘吉平, 吕宪国, 吴正方. 吉林省旱涝灾害地域组合规律的动态变化[J]. 中国农业气象, 2004, 2(25): 5-7. (LIU Jiping, LYU Xianguo, WU Zhengfang. Dynamic Change of Regional Combination Law of Drought and Flood Disasters in Jilin Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 2(25): 5-7. (in Chinese))

(上接第 94 页)

- [5] 闵健. 搅拌槽内宏观及微观混合的实验研究与数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2005. (MIN Jian. Experimental Study and Numerical Simulation of Micromixing and Micromixing in Stirred Tanks[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005. (in Chinese))
- [6] 张国娟, 闵健. 涡轮桨搅拌槽内混合过程的数值模拟[J]. 北京化工大学学报, 2004, 31(6): 24-27. (ZHANG Guojuan, MIN Jian. Numerical Simulation of Mixing Process in a Stirred Tank with Rushton Turbine[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2004, 31(6): 24-27. (in Chinese))
- [7] 王展, 尹应武. 一种新型轴流搅拌桨的开发[J]. 化工装备技术, 2004, 25(1): 1-4. (WANG Zhan, YIN Yingwu. Develop of a New Kind of Axialflow Stirrer[J]. Chemical Equipment Technology, 2004, 25(1): 1-4. (in Chinese))
- [8] 李志鹏. CBY 搅拌桨叶的数值分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2004. (LI Zhipeng. Numerical Analysis of Impeller CBY in Stirred tank[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004. (in Chinese))
- [9] 郑建坤, 赵恒文. 曲面型叶片轴流式搅拌器数值模拟研究[J]. 机械制造与自动化, 2013, 26(5): 166-168. (ZHENG Jiankun, ZHAO Hengwen. Numerical Simulation of Curved Blade Axialflow Stirrer[J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2013, 26(5): 166-168. (in Chinese))
- [10] 陈志平, 章序文. 搅拌与混合设备设计选用手册[K]. 北京: 化学工业出版社, 2004. (CHEN Zhiping, ZHANG Xuwen. Design manual of Mixing Equipment[K]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese))
- [11] C. A. J. Fletcher. Computerial Techniques for Fluid Dynamics, Vol. 1 and 2[M]. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [12] B. E. Launder, D. B. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [13] 彭珍珍, 赵恒文. 双曲面搅拌机流场的数值模拟研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(19): 91-94. (PENG Zhenzhen, ZHAO Hengwen. Numerical Simulation of Flow Field in Hyperboloid Stirrer[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 25(19): 91-94. (in Chinese))
- [14] 郭聪聪, 赵恒文. 搅拌槽内挡板对搅拌效果的数值模拟[J]. 中国给水排水, 2011, 01(1). (GUO Congcong, ZHAO Hengwen. Numerical Simulation of Baffle Mixing Effects in Stirred Tank[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 01(1). (in Chinese))
- [15] 王凯, 虞军. 搅拌设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. (WANG Kai, YU Jun. Mixing Equipment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese))