

文章编号:1674-2869(2011)05-0078-04

# 立式撞击流反应器中桨叶优化设计

张 涛,吴艳阳,杨 清,李 良

(武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**为探讨倾斜角对立式循环撞击流反应器(VCISR)混合性能和桨叶受力的影响规律,采用数值方法分别模拟了四种倾斜角下对反应器内流速和桨叶受力情况,并展开了对比分析,将桨叶倾斜角  $\theta$  分别设置为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 。结果表明,当  $\theta=45^\circ$  时,反应器内的混合性能最佳;工质的循环能力最强;上下桨叶受到的合力最小;桨叶绕  $Z$  轴旋转的合力矩最小,该结果为立式撞击流反应器的桨叶的倾斜角优化设计提供理论参考依据。

**关键词:**立式撞击流反应器;倾斜角;混合性能

中图分类号:TQ05

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2011.05.021

## 0 引 言

撞击流作为一种新颖的技术方法<sup>[1]</sup>,首先由 Elperin 提出<sup>[2]</sup>,其基本思想是使两股相向流动的流体产生撞击,从而促进反应和混合的作用。撞击流技术应用广泛,利用该技术可进行脱硫实验,其优点在于:结构简单、操作方便,费用较低<sup>[3]</sup>,可为沉淀反应制备超细粉体提供适宜环境<sup>[4]</sup>。立式循环撞击流反应器(Vertical Circulative Impinging Stream Reactor, 简称 VCISR)<sup>[5]</sup>结构示意图如图 1 所示。

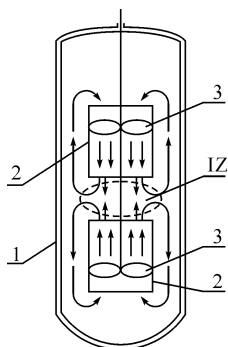


图 1 VCISR 结构简图

Fig.1 Schematic diagram of VCISR

注:1 为外壳;2 为导流筒;3 为桨叶;IZ 为撞击区

该反应器立式设计,上下分别对称的安装两导流筒,其旋转桨叶置于导流筒内,推动工质沿导流筒相向撞击,在中间径向面上形成高度的湍动撞击区域,即 IZ(impingement zone)区域,该区域

内的工质混合强烈。其中桨叶是影响 IZ 区域特征行为的重要因素之一,桨叶倾斜角的不同引起反应器内的混合效果存在差异。本文模拟和研究了四种桨叶的倾斜角下( $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ )对反应器内的混合性能和桨叶受力的工况。

## 1 计算模型

### 1.1 几何条件

建模:以反应器模型建立的坐标系如图 2 所示,反应器底面中心为  $o$  点, $z$  轴与导流筒的所在轴线重合, $x-y$  平面为撞击面, $x-z$  和  $y-z$  平面为垂直面。为了得到更加准确的模拟结果,对导流筒内在区域的网格进行加密处理。

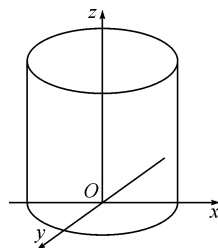


图 2 VCISR 几何模型

Fig.2 Geometric model of the VCISR

固定条件:数值模拟的反应器采用三叶斜桨式,三桨叶的优点在于:低能耗和强循环。反应器总高为 60 cm,外径为 40 cm,导流筒高度为 15 cm,上下导流筒和上下桨叶距反应器的顶部、

收稿日期:2010-11-05

基金项目:国家自然科学基金 50906065

作者简介:张 涛(1987-),男,湖北天门人,硕士研究生,研究方向:化工过程机械。

指导老师:吴艳阳,男,教授,博士,硕士研究生指导老师,研究方向:压力容器及管道无损检测、汽车冲压件焊接变形控制、以及汽车焊装生产线焊接夹具优化设计,结构力学等。

底部分别为 10 cm、15 cm,反应器壳体长径比  $\frac{H}{D}=1.5$ ,桨直径与反应器直径比  $\frac{d}{D}=0.35$ ,桨宽与桨直径比  $\frac{b}{d}=0.15$ .

可变条件:上下桨叶的倾斜角  $\theta$  分别设置为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ ,如图 3 所示.

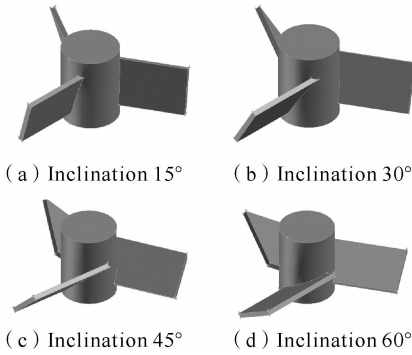


图 3 不同倾角搅拌桨示意图

Fig. 3 Schematic diagram of impeller with different blade inclination

1.2 计算条件

采用动参考系模型方法对建立的物模型进行数值模拟计算,将动区域内的工质设定以搅拌桨相同转速进行旋转.容器壁面及导流筒壁面满足固定无滑移壁面边界条件,搅拌桨和转动轴为滑移壁面,容器壁面及导流筒壁面上有  $V_x = V_y = V_z = 0$ <sup>[6]</sup>,本文假设流体为连续、不可压缩的液体,

均在  $20^\circ\text{C}$  等温条件下进行,工质为蒸馏水.

2 数值模拟结果

2.1 撞击特征面上的速度分析

在转速 900 r/min 条件下,数值模拟 VCISR 轴向和径向流场,得速度云图.图 4、图 5 分别为径向和轴向的速度云图.由图 4 得到,以导流筒轴线为对称轴,对称轴左右的速度分布基本对称,导流筒限定了循环路径,云图上无流体短路现象,由图 5 得,沿导流筒正上方向的撞击速度较大,在该垂直方向上形成强烈的撞击区域.撞击面流场速度梯度越大,其强化混合效果越显著,速度梯度是速度大小的离散程度的重要指标,梯度越大则速度值的离散程度越高,因此通过离散程度的重要指标——速度均方根  $\sigma$  来衡量速度梯度, $\sigma$  越大表明速度值的离散程度越大,速度梯度也越大,混合效果更佳.为了更清晰地分析速度大小,在  $xoz$  平面,  $Z=30$  面上分别采集  $x=5、10、14、17、23、26、30、35$ ,  $x=0、y=0$  线段上的若干个点的速度值,求所取速度的均方根,以表示混合程度.表 1 为计算所得到的速度均方根值.

表 1 表示在错位角为  $45^\circ$  时,速度的均方根最大,表明速度的离散程度越大,说明四种倾角下,在倾角为  $45^\circ$  工况下,反应器内的混合性能最优.

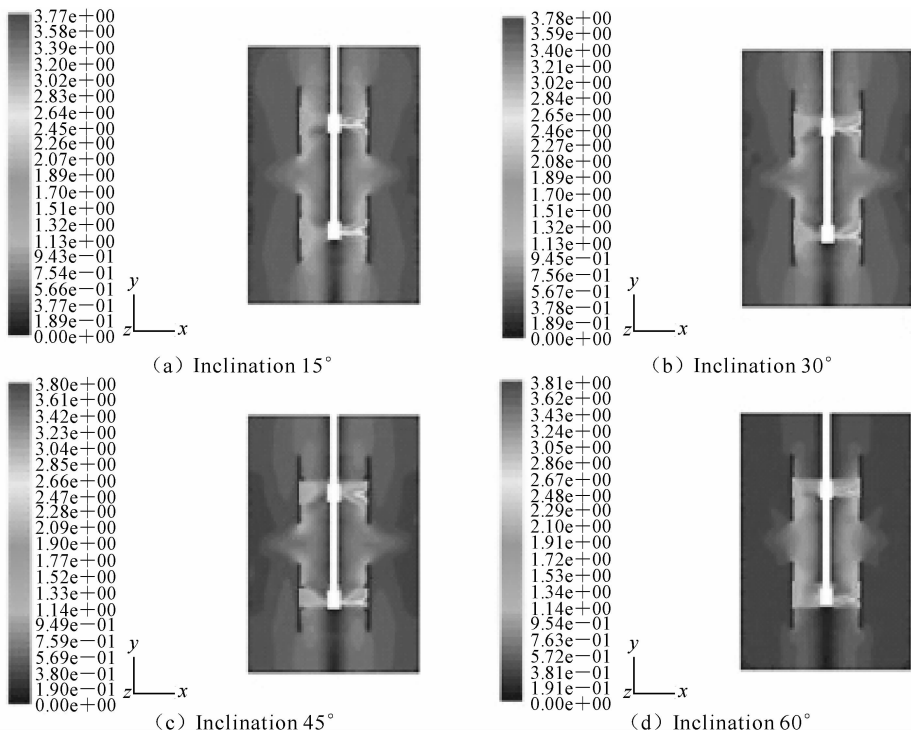


图 4  $xoz$  面上的速度云图

Fig. 4 The contours of the velocity on the  $xoz$  surface under the different inclinations

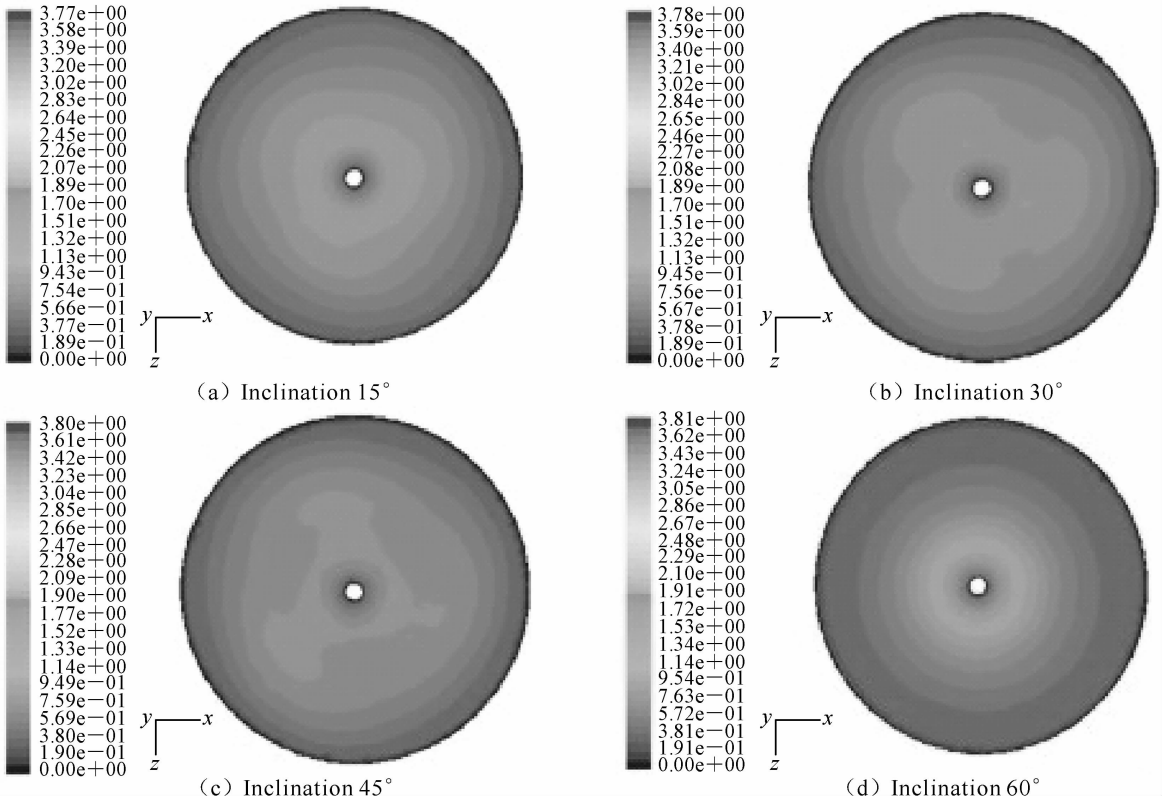


图 5 不同倾角下  $z=30$  cm 面上的速度云图

Fig. 5 The contours of the velocity on the  $z=30$  cm surface under the different inclinations

表 1 速度均方根

Table 1 The root-mean-square of the speed

倾斜角 $\theta/(^\circ)$	均方根 $\sigma$
15	1.143 4
30	1.434 6
45	1.582 1
60	1.467 1

### 2.2 循环次数

立式循环撞击流反应器的混合特征行为强烈取决于反应器内的接触程度,使工质组分之间有机会相撞击,进行混合或者反应,消除传递界限,提供良好的混合和接触,同时也保持较好的循环特性,可防止过冷点、过热点、死区的形成. 桨叶的倾角与循环流量呈非线性关系,当倾角增大,工质的速度增大,但桨叶在  $xoy$  平面上的投影面积减小. 循环流量与工质沿  $Z$  轴方向上的速度和桨叶面积  $s$  之间的关系如公式(1). 由公式(2)<sup>[7]</sup> 计算工质的循环次数.

$$Q_c = 6v_z s \cos \theta \quad (1)$$

$$n = Q_c / V \quad (2)$$

式(2)中,  $v_z$  表示桨叶排出工质沿着  $Z$  轴方向上的平均速度,  $s$  表示桨叶的面积,  $Q_c$  表示循环流量,  $n$  为

工质在单位时间内的循环次数,  $V$  表示反应器的容积. 根据公式(1)、(2)计算得到表 2.

表 2 不同的倾角下的循环次数

Table 2 The cycling times under the different inclinations

倾斜角 $\theta/(^\circ)$	循环次数
15	0.159
30	0.280
45	0.327
60	0.290

由表 2 得,倾斜角在  $45^\circ$  时反应器内的循环次数最大,该结论可为桨叶的设计提供参考依据.

### 3 桨叶受力分析

在 VCISR 的构件设计中,理清其受力情况,才能够准确的对其进行设计,保证强度和刚度、稳定性等各方面的要求,才满足结构安全性. 上桨叶受力  $F_{\uparrow}$ , 下桨叶受力  $F_{\downarrow}$ , 如图 6 所示, 由于上下桨叶固定在同一根转动轴上, 下桨叶受工质的压力比上桨叶所受压力大, 得  $F_{\uparrow} > F_{\downarrow}$ , 把上桨叶和下桨叶当整体, 整体所受力  $F = F_{\downarrow} - F_{\uparrow}$ , 合力方向向下.  $F_{\uparrow}$ 、 $F_{\downarrow}$ 、上下桨叶绕  $Z$  轴的合力矩  $M$ , 都可用 fluent 计算得到, 分别如表 3 和表 4 所示.

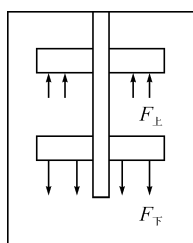


图6 桨叶受力分析图

Fig. 6 The diagram of force analysis of the blades

表3 上下桨叶所受合力

Table 3 The resultant force of the fluctuation blades

倾斜角 $\theta/(\circ)$	合力 $F/N$
15	0.165
30	0.643
45	0.097
60	0.170

表4 上下桨叶所受合力矩

Table 4 The resultant moment of the fluctuation blades

倾斜角 $\theta/(\circ)$	合力矩 $M/N \cdot m^{-1}$
15	0.721
30	0.640
45	0.513
60	0.603

虽然上下桨叶所受的合力较小,但容器长期处于工作状态下,会导致联轴器(或电动机)与转动轴之间的紧固连接处磨损,引起紧固受力不均匀,甚至不能有效传递电动机输出的扭矩.根据合力大小,可以选择用户所需要的轴封形式,如V形及矩形密封<sup>[8]</sup>.表3表明,桨叶的倾斜角在45°时,桨叶受到的合力最小.

转动轴应具有足够的扭转强度和弯曲强度,转动轴一般设计成刚性轴,不但具有足够的刚性,还可防止发生共振,为了保证转动轴刚度和强度,尤其是桨叶的根部所受的弯矩最大,根部界面必须具有足够的抗弯截面模量,为了延长反应器的使用寿命,必须控制桨叶绕旋转轴Z轴所受的力矩,表4表明倾斜角在45°时,桨叶绕Z轴旋转所受到的合力矩最小.表3、4表明,倾斜角为45°时,

桨叶的受力效果最佳.

## 4 结语

采用数值方法对立式撞击流循环反应器中的桨叶的倾斜角度问题进行了计算,计算中展开了桨叶的倾斜角 $\theta$ 在15°、30°、45°、60°不同工况对比分析,从中得出如下结论.

a. 桨叶的倾斜角为45°工况下,反应器内的流场内速度的均方根最大,表明反应器内工质的混合效果最优.

b. 桨叶的倾斜角在45°的工况下,反应器内工质的循环次数最大.

c. 在四种倾斜角下,倾斜角为45°时,上下桨叶受到的合力最小,同时绕Z轴的力矩也最小,该结论为立式循环撞击流反应器的桨叶的结构设计提供有效的理论参考.

## 参考文献:

- [1] 伍沅. 撞击流:原理·性质·应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [2] WU Yuan. Properties and Application of Impinging Streams [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2002, 24(1): 9-16.
- [3] 周玉新,程敬华. 浸没循环撞击流反应器制备纳米氧化铝的工艺研究[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(5): 1-4.
- [4] 李芳,伍沅. 撞击流吸收器燃煤烟气湿法脱硫(1)装置设计[J]. 武汉工程大学学报, 2005, 27(1): 43-45.
- [5] 伍沅,徐建民. 立式循环撞击流反应器[P]. 中国专利, ZL03235518. 1. 2003.
- [6] 张建伟,徐成海. 浸没循环撞击流反应器的流场数值模拟[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2004, 25(2): 156-159.
- [7] 陈志平,章序文,林兴华. 搅拌预混合设备设计选用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [8] 高九阳,俞九阳,王成刚. 沟槽对O形密封结构性能的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(7): 78-80.

(下转第88页)