

撞击流反应器中导流螺旋片强化撞击过程的数值模拟

罗燕^{1,2}, 周剑秋¹, 郭钊², 熊卉², 杨侠²

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009;

2. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:为研究导流螺旋片对立式循环撞击流强化撞击过程的规律, 提出最优的导流螺旋片尺寸. 采用 Fluent 软件对立式循环撞击流反应器中增加导流螺旋片前、后的撞击过程进行数值模拟, 得到了导流螺旋片厚度分别为 0、10、20、30 mm 和螺圈数分别为 0、1、2 的反应器流场的速度矢量图、特征撞击面上的平均速度和速度均方根差, 并对比分析了其传质性能及混合性能. 结果表明, 增加了导流螺旋片, 导流筒内部出现了流线弯曲及流动斜交, 提高了流场的各向异性, 使流场中速度分层明显, 并增大了速度梯度, 从而强化了撞击区之外的流场混合. 同时, 当螺圈数 $N=1$, 螺旋片的厚度 $L=30$ mm 时, 反应器内撞击过程中的相间传质效果最好; 当不加螺旋片时, 反应器内撞击过程中的相间混合效果最好.

关键词:立式循环; 撞击流反应器; 数值模拟; 导流片; 厚度; 螺圈数

中图分类号: TQ05

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2012.11.013

0 引言

撞击流(impinging streams)的基本原理是使两股等量工质同轴高速相向流动并在中间面上相互撞击, 以此强化相间传递及混合^[1-3]. 立式循环撞击流反应器 VCISR (Vertical Circulative Impinging Stream Reactor) 是由我国伍沅教授设计的一种撞击流新型反应器^[4], 利用了液体连续相撞击流的所有优越特性, 大幅度提高流团间的剪切速率, 促进了混合^[5]. 为强化 VCISR 混合性能, 杨侠等学者从不同角度对 VCISR 进行数值模拟^[6-8], 包括桨叶布置形式、桨叶倾角、转速、导流筒间距等, 从中得出了最佳混合性能尺寸. 本文在前期研究基础上, 对 VCISR 的结构进行进一步优化, 即在前期研究中选取最优桨叶布置形式、桨叶倾角、导流筒间距尺寸等, 另外在导流筒内壁增加螺旋片, 并进行数值模拟, 以分析研究螺旋片尺寸和螺圈数变化对混合性能的影响, 找出螺旋片的最优尺寸和螺圈数, 进一步为 VCISR 的结构优化提供依据.

1 数值模拟

笔者采用 CFD 软件 FLUENT 对 VCISR 导

流筒内加螺旋片的撞击过程进行数值模拟. VCISR 结构如图 1 所示, 上、下螺旋桨推动工质分别从两端沿导流筒流动, 并在容器中部相向撞击, 形成剧烈湍动的撞击区.

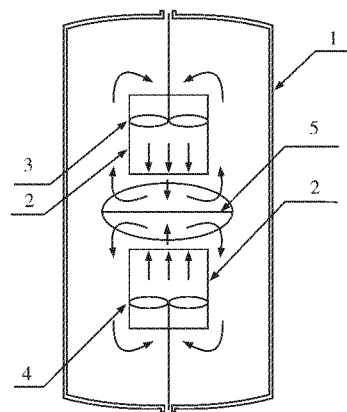


图 1 VCISR 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VCISR

注: 1——容器; 2——导流筒; 3, 4——螺旋桨; 5——撞击区

1.1 几何模型

依据反应器建立的坐标系如图 2(a) 所示, 反应器几何对称中心点为坐标原点 O , 水平径向为 x 轴, 垂直径向为 z 轴, 与导流筒方向平行的轴线为 y 轴. 类比 VCISR 实体结构和尺寸构建三维几何模型, 反应器高为 600 mm, 外径 400 mm; 上下两

收稿日期: 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51276131)

作者简介: 罗燕 (1977-), 女, 湖北黄梅人, 助教, 博士研究生, 研究方向: 化学过程机械、撞击流技术.

个导流筒高为 220 mm,外径为 300 mm,两导流筒间距为 60 mm,如图 2(b)所示。

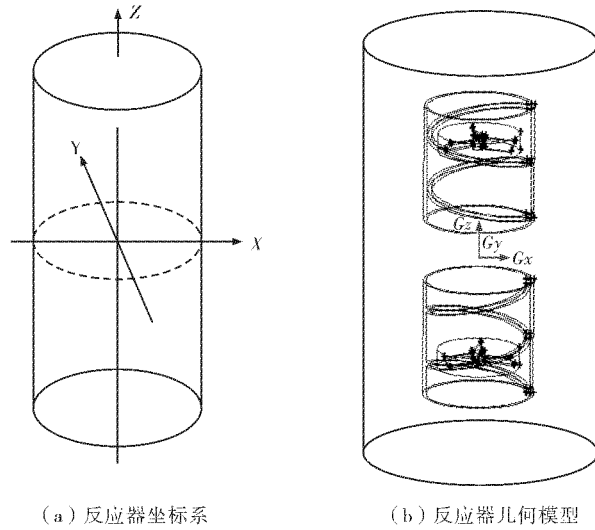


图 2 VCISR 几何模型

Fig. 2 Geometric model of the VCISR

由于导流筒高度一定,取螺旋片的厚度与圈数为变量,设置螺旋片的厚度 L 分别为 0 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 螺圈数 N 分别为 0 mm, 1 mm, 2 mm, 几何结构如图 3 所示。

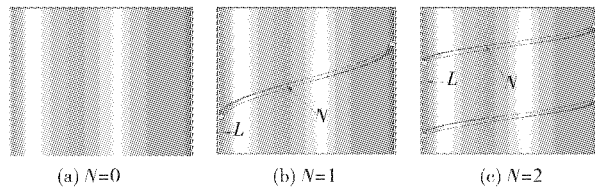


图 3 $L=20$ mm 时螺旋片几何结构示意图

Fig. 3 Geometric model of the spiral lamella with $L=20$ mm

1.2 边界条件

由于计算区域中运动区域和静止区域同时存在,笔者采用动态参考系(MRF)^[9]模型来解算.使用压力基隐式求解器,运用 SIMPLEC 耦合速度场和压力场,指定两个桨叶所在的区域为动区域并定义其以大小相等、方向相反的速度旋转,使流体相向撞击流动,转速为 900 r/min. 为简化计算,数值模拟中设定工质为标准状态下蒸馏水,连续、不可压缩牛顿液体,其中工质密度 ρ 为 998.2 kg/m³,黏度 μ 为 1.002 MPa·s,工质比热 C 为 4.183 kJ/(kg·℃),导热系数 λ 为 0.599 W/(m·℃)。

2 模拟结果及分析

通过数值计算得到 VCISR 的流场,并选取纵剖面 and 几何对称面两个特征面讨论速度分布及速度梯度分布. 计算结果表明,不同的螺旋片尺寸和螺圈数会影响相间传递,改变撞击过程. 图 4 为不

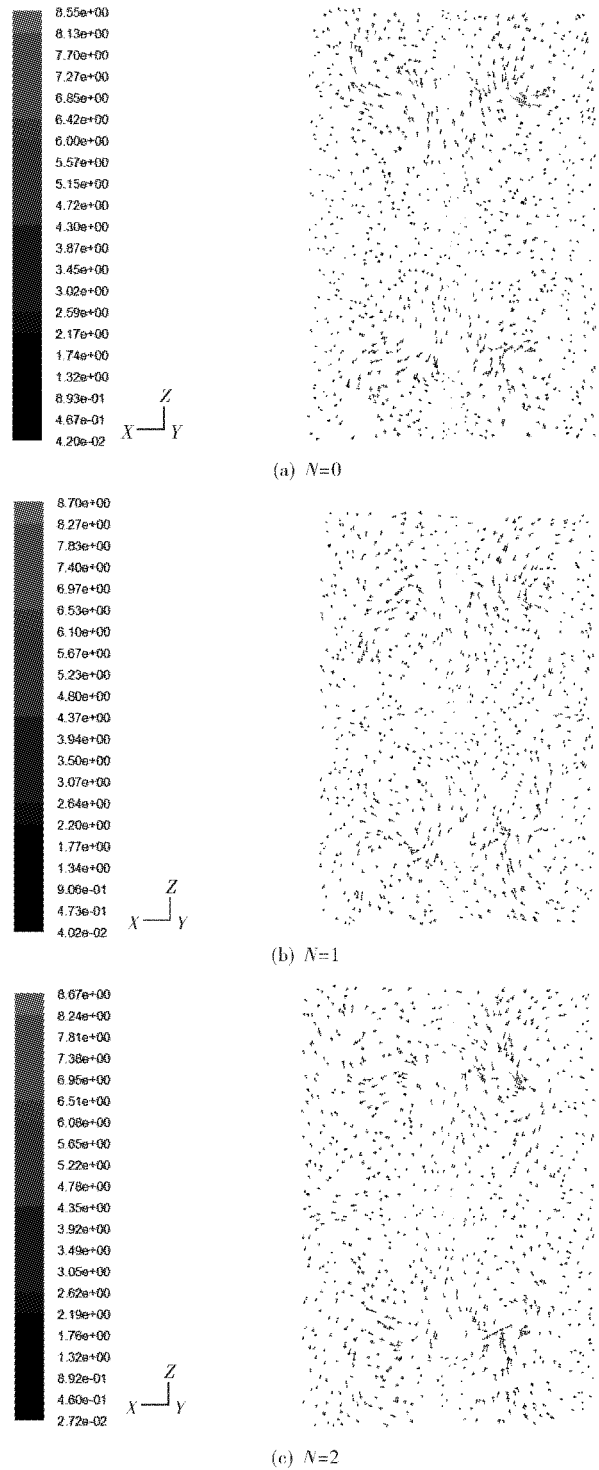


图 4 $L=20$ mm 时纵剖面的速度矢量图

Fig. 4 The vectors of the velocity on the longitudinal diagram with $L=20$ mm

同螺圈数下纵剖面(xoz)上的速度矢量图,因篇幅有限这里仅列出 $L=20$ mm 时的速度矢量图. 从图 4 可以看出两个导流筒之间的速度值变化较明显. 增加螺旋片后特征撞击面上速度梯度的变化与增加螺旋片之前的有很大区别,说明螺旋片的增加改变了流团之间的剪切厚度与方向,对撞击过程造成很大影响,在导流筒内部,螺旋片起到扰

动作用,导流筒内部出现了流线弯曲及流动斜交,提高了流场的各向异性,使其速度分层范围扩大、更明显,流体层之间接触面积增大,从而强化了撞击区之外的流场混合,这样可以促进混合的效果;且梯度变化关于几何对称面 xoy 对称,这与伍沅教授实验得出的撞击区位置相符^[10],因此选取几何对称面为特征撞击面。

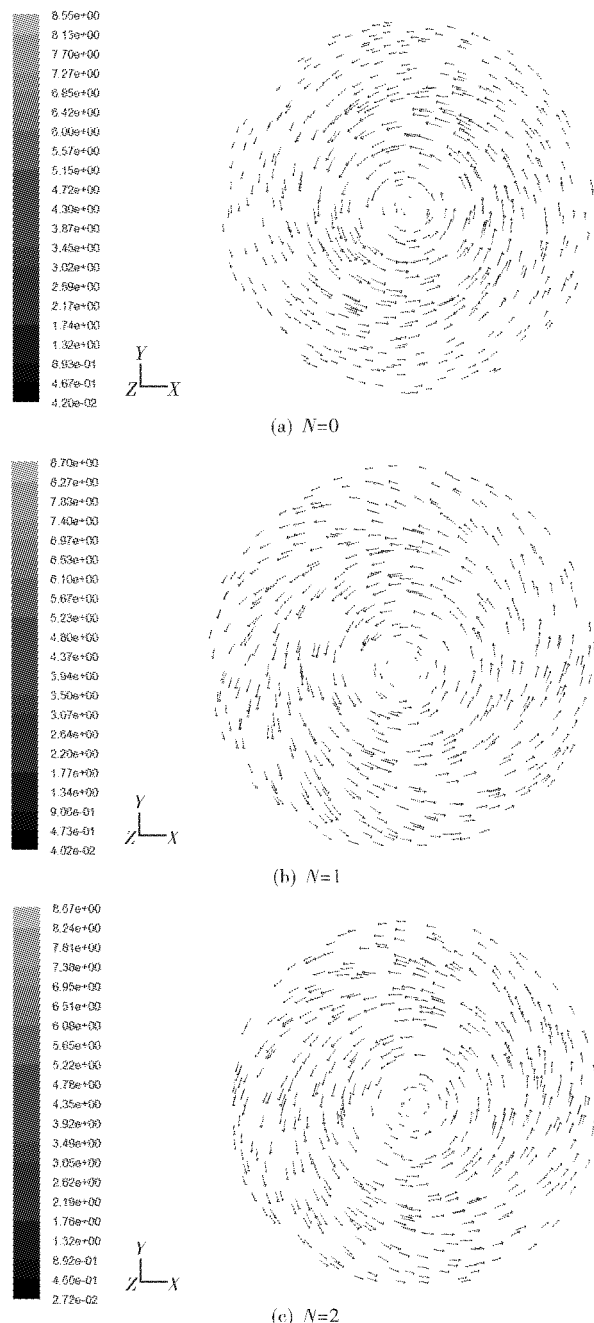


图 5 $L=20$ mm 时特征撞击面的速度矢量图

Fig. 5 The vectors of the velocity on the impinging surface with $L=20$ mm

图 5 为螺旋片的厚度 $L=4$ mm 时特征撞击面上的速度矢量图,从图中可以看出,增加螺旋片后,特征撞击面上的速度呈不对称分布,这是螺旋片在导流筒的出口方向影响的结果。

为了更精确的分析不同螺旋片尺寸下特征撞击面上的速度分布,在特征撞击面的径向正方向(x)采集 130 个数据点,绘成不同螺片厚度和螺圈数下的径向距离—速度关系坐标图。图 6 所示为 $L=20$ mm 时不同螺圈数的撞击面速度散点图,图 7 所示为 $N=2$ 时不同螺片厚度的撞击面速度散点图。可以看出螺旋片的增加降低了撞击面上的最大速度,阻碍了反应器内流体的流动。

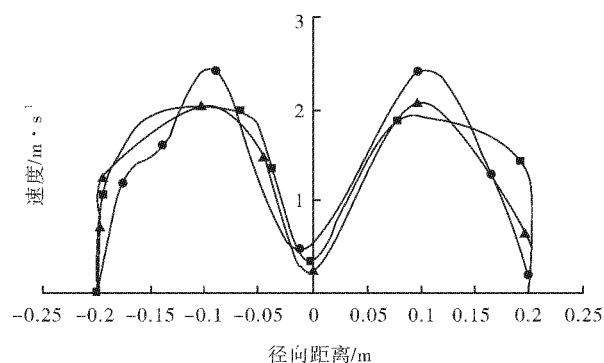


图 6 $L=20$ mm 时不同螺圈数的撞击面速度曲线图

Fig. 6 The speed curve diagram of different spire turn number on the impinging surface with $L=20$ mm

注: \bullet — $N=0$; \blacksquare — $N=1$; \blacktriangle — $N=2$

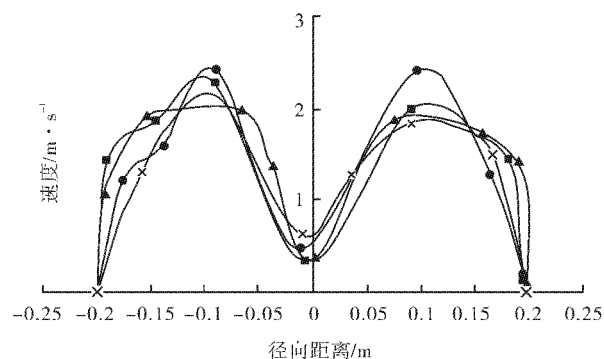


图 7 $N=1$ 时不同螺旋片厚度的撞击面速度曲线图

Fig. 7 The speed curve diagram of the thickness of different spiral lamella on the impinging surface with $L=20$ mm

注: \bullet — $L=0$ mm; \blacksquare — $L=10$ mm; \blacktriangle — $L=20$ mm; \times — $L=30$ mm

为了研究螺旋片的最优尺寸和螺圈数,引入径向平均速度值表征撞击过程中的传递效果,径向速度均方根差表征撞击过程中的混合效果。表 1 所示为特征撞击面上的径向平均速度,表中显示当圈数 N 一定时,平均速度值随着厚度 L 呈不规则变化;当厚度 L 一定时,平均速度值随着圈数 N 也呈不规则变化;但当 $N=1, L=30$ mm 时,平均速度存在一最大值,即该尺寸的螺旋片传质效果最佳。

表 1 撞击面径向沿 x 方向各点平均速度值
Table 1 The different point average velocity of
impinging surface radially along the x direction

厚度 L/mm	螺圈数		
	$N=0$	$N=1$	$N=2$
0	1.582	1.582	1.582
10	1.582	1.584	1.560
20	1.582	1.562	1.587
30	1.582	1.604	1.418

对于撞击流反应器的混合性能,撞击区内的速度梯度越大其相间混合越好.伍沅教授曾定义瞬变压力的均方差来描述压力波动强度^[11],笔者曾通过速度分布的均方根差 σ 来表示速度值的离散程度^[12],本文引入速度分布的均方根差 σ 来表征撞击面径向速度(v_x)的梯度.根据定义,均方根差越大则径向速度偏离平均值的程度也越大,那么速度梯度也越大,撞击过程中的相间混合越好.速度分布的均方根差 σ 计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (1)$$

式(1)中 v_i 为第 i 点的速度; n 为对应曲线上的取样次数; \bar{v} 为对应曲线上的径向平均速度.

表 2 撞击面径向沿 x 方向各点均方差根值

Table 2 The root-mean-square of impinging
surface radially along the x direction

厚度 L/mm	螺圈数		
	$N=0$	$N=1$	$N=2$
0	0.604	0.604	0.604
10	0.604	0.489	0.528
20	0.604	0.498	0.523
30	0.604	0.466	0.447

表 2 所示为均方根差 σ 与螺旋片尺寸和圈数的关系,显示均方根差随螺旋片厚度和圈数呈不规则变化,当 $N=0, L=0 \text{ mm}$ 时,均方根差最大,则速度梯度最大,混合性能良好,即在没有螺旋片时,其混合性能最优.

3 结 语

a. 螺旋片的增加改变了流团之间的剪切厚度与方向;螺旋片在导流筒的出口方向影响了特征

撞击面上的速度分布,对流体流动存在扰动作用,导流筒内部出现了流线弯曲及流动斜交,提高了流场的各向异性,从而使其速度分层范围扩大,促进了混合,并且特征撞击面上速度呈不对称分布.

b. 螺旋片的增加降低了撞击面上的最大速度,阻碍了反应器内流体的流动.

c. 螺旋片的增加,使撞击面上的平均速度、均方根速度呈不规则变化,且使其表征的混合性能降低,没有强化撞击过程.

参考文献:

- [1] Elperin IT. Heat and Mass Transfer in Opposing Current [J]. Engng Physics, 1961, 21(6): 62-68.
- [2] Pitt G J, Millward G R. Coal and Modern Coal Processing: An Introduction [M]. New York: Academic Press, 1979.
- [3] Bley P, Ehrfeld W. Molecular dynamics of disparate mixtures in opposed jets[M]. In: Fisher S S (ed). New York: Rarefied Gas Dynamics. AIAA, 1981.
- [4] 伍沅. 立式循环撞击流反应器[P]. 中国专利: ZL03235518.1, 2004-12-01.
- [5] 伍沅, 肖杨, 周玉新, 等. 浸没循环撞击流反应器中的微观混合[J]. 中国化学工程学报, 英文版, 2003, 11(4): 420-425.
- [6] 杨侠, 罗燕, 郭嘉, 等. 立式循环撞击流反应器三维流场的数值模拟[J]. 化工机械, 2011, 38(1): 87-90.
- [7] 杨侠, 张涛, 梁利云, 等. 立式循环撞击流反应器中桨叶垂直交错排布条件下的混合性能[J]. 化工进展, 2011, 30(4): 715-719.
- [8] 杨侠, 毛志慧, 吴艳阳, 等. 立式循环撞击流反应器不同倾角桨叶的混合性能比较[J]. 化工机械, 2011, 38(3): 331-334, 374.
- [9] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真应用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [10] 张涛, 吴艳阳, 杨清, 等. 立式撞击流反应器中桨叶优化设计[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(5): 78-81.
- [11] 伍沅. 撞击流: 原理·性质·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [12] 杨侠, 刘丰良, 毛志慧, 等. 立式循环撞击流反应器不同撞击间距下混合性能分析[J]. 化工进展, 2012, 31(6): 1210-1214.

Numerical simulation of strengthening impingement process of impinging stream reactor with spiral lamella

LUO Yan^{1, 2}, ZHOU Jian-qiu¹, GUO Zhao², XIONG Hui², YANG Xia²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the law of strengthening the impingement process of vertical circulation impinging stream reactor (VCISR) with spiral lamella, the optimal dimension of spiral lamella was proposed. In the before and after the installation of spiral lamella, the impingement process of VCISR was simulated numerically by using Fluent software. Then the vectors of the velocity, average velocity and root-mean-square velocity were obtained between spiral lamella of 0, 10, 20, 30 and spire turn number of 0, 1, 2. By means of them, the mass transfer and the mixing performance were compared. The results show that, after the installation of spiral lamella, the bend and bias of streamline which appears inside the draft tube promotes the anisotropy of the flow field. It also contributes to the formation of distinct velocity layer and the increasing of the velocity gradient, thereby strengthening the mixing of the flow field outside the impinging zone. At the same time, the best result of mass transfer performance is obtained when the spire turn number N is 1 and the thickness of spiral lamella is 30 mm, the mixing performance is the best when the spiral lamella is not installed.

Key words: vertical circulation; impinging stream reactor; numerical simulation; spiral lamella; thickness; spire turn number

本文编辑:陈小平



(上接第 33 页)

Construction of ventilation system and drainage system in Xiren phosphorus mine

YAN De-chuan¹, HU Wen-jun², HU Zhang-di³

(1. Hubei Zhongxiang Xiren Chemical Industry Co. Ltd., Jingmen 448000, China;

2. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

3. School of Law and Business, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to eliminate the differences between mining design scheme and actual situation of the corporation, central-diagonal ventilation was adopted in ventilation system, according to the author's experience of construction in Xiren phosphorus mine. Air entered main shaft and came out from ramp No. 1 and ramp No. 2, without extra air shaft. By means of changing the plan, cost of driving wind well and ventilation was cut down. Besides, wind resistance was reduced. Multistage drainage was replaced by single-stage drainage plan. Additionally, the capacity of water sump and the storage time were increased. In the amended plan, investment for water sump and pump room on -10m level is canceled. Thus, the personnel management cost of the two pump rooms on -10m level and $+40\text{m}$ level is cut down. Although the investment of water sump is increased for the sake of increasing capacity, off-peak power consumption in the depressed time is realized and drainage cost is reduced.

Key words: mine; construction; design; construction management; ventilation system; drainage system

本文编辑:陈小平