

# 基于 CFD 的旋流喷嘴内部流场模拟研究

王 瑾, 郝惠娣\*, 曹乔乔

(西北大学化工学院, 陕西 西安 710069)

**摘要:**采用计算流体力学 CFD 软件对喷淋式脱硫塔中旋流喷嘴的内流场的流体行为进行模拟分析。分析了喷嘴的整体速度与出口的雾化效果, 对比了不同入口个数下喷嘴内部流场各截面上的速度矢量, 以及有无喉颈段喷嘴的雾化效果。模拟结果显示, 在相同条件下, 无喉颈段的四入口旋流喷嘴内部流体速度分布均匀, 且相对较大, 喷射后雾化锥角大雾化, 效果。

**关键词:**计算流体力学; 入口个数; 速度矢量; 雾化效果

**中图分类号:** TQ051.72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2015)03-0159-03

## Simulation of internal flow field in swirl nozzle by CFD

WANG Jin, HAO Hui-di\*, CAO Qiao-qiao

(College of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** The fluid flow behavior of internal flow filed in swirl nozzle is simulated by using CFD software. The overall speed and atomization effect in swirl nozzle are analyzed. The influence of entrance numbers on velocity vector of each section in inlet swirl nozzle is studied. The atomization effects in presence or absence of outlet section are compared as well. The results show that the swirl nozzle with four entrances is much better than others in absence of outlet section, which can be used as a reference to the desulfurization tower.

**Key words:** computational fluid dynamics; entrance numbers; velocity vector; atomization quality

喷嘴是脱硫技术<sup>[1]</sup>的关键部件, 喷嘴性能的好坏直接影响到湿法烟气脱硫系统的效率以及运行的可靠性。在湿法烟道气脱硫工艺<sup>[2-3]</sup>中, 喷嘴的作用是将大量的石灰石浆液转化为雾化小液滴, 并提供足够的接触面积以有效吸收烟气中的 SO<sub>2</sub>, 低压旋流喷嘴料液处理量很大, 结构简单而且不易堵塞, 因此成为理想的选择, 并被广泛使用<sup>[4-5]</sup>。现如今, 很多学者已经对低压旋流喷嘴进行了研究, 但是对其结构优化的探讨还没有一致的定论。在喷淋式脱硫塔中, 由于喷嘴结构或者参数的不适, 导致喷嘴存在雾化效果变差、喷射出来石灰浆液的速度变小等问题, 这些都使得脱硫效率降低, 进而影响化工生产进度, 并且造成操作费用的增加以及环境的污染。因此对喷嘴内部结构及性能的研究很有必要, 伴随着计算流体力学科学技术(CFD)的极速发展, 可以对不同结构参数的旋流喷嘴内部进行数值模拟, 主要得到内部流场的迹线图以及相关云图, 进而获得优化的结构参数, 为后续研究做铺垫。

利用 CFD 软件进行模拟主要分为前处理模块、分析计算模块和后处理模块 3 部分, 其中前处理模块提供了一个强大的实体建模以及网格划分工具, 以方便用户构造有限元模型; 分析计算模块包括流

体动力学分析、结构分析、电磁场分析以及多物理场的耦合分析, 该模块可以模拟多种物理介质的相互作用, 具有灵敏度分析及优化分析能力; 后处理模块可以将计算结果以图表形式、曲线形式显示出来, 亦可以输出<sup>[6]</sup>。

## 1 物理模型

所研究的低压旋流喷嘴的结构如图 1。

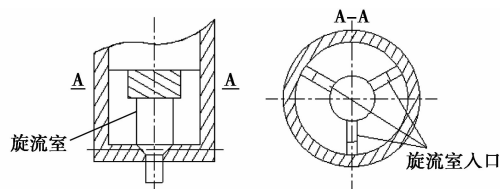


图 1 低压旋流喷嘴结构图

在喷淋式脱硫塔喷嘴内部, 石灰浆液经由喷嘴入口处进入到旋流室中, 在旋流室中进行径向的离心旋转, 同时还加有轴向的运动, 最终通过喷嘴的喉颈段, 由喷嘴的出口处呈雾状喷散出去与外部的烟道气进行接触反应, 进而达到脱硫的效果<sup>[7-8]</sup>。

由图 1 中可以看到低压旋流喷嘴的结构相对简单, 在模拟实验中选取旋流室直径  $D$  为 3 mm, 长度  $H$  为 3.5 mm, 旋流室的内锥角为 120°, 喷嘴出口段

收稿日期: 2014-09-24

基金项目: 陕西省科技厅研究发展计划(2011K10-21); 陕西省教育厅专项基金(11JK0619)

作者简介: 王瑾(1989-), 女, 硕士生; 郝惠娣(1960-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为新型反应器的开发研究以及生物化工方向设备的开发研究与计算机模拟技术研究, 通讯联系人, 757428679@qq.com。

喉颈长度  $l$  为 1.5 mm, 喷孔的直径  $d$  为 1 mm, 根据前辈们的研究<sup>[9-10]</sup>, 了解到喷嘴的入口个数不是越多越好, 个数的增加会使得进入旋流室的流体之间产生流体的互扰现象, 因此在其他参数一致的情况下, 对二入口、三入口以及四入口的低压旋流喷嘴进行模拟对比分析, 另外在此基础上还研究了有无喉颈段的喷嘴性能的优劣, 主要分析的是喷嘴内部流场的迹线图、速度矢量图以及相关云图。

## 2 模拟过程

喷嘴模型的建立在 Workbench 板块中进行, 模型的网格在 Mesh 中划分, 划分结果如图 2、图 3 所示, 选择网格的形状为四面体 (tetrahedrons), 参数定义分别为 Body Size (0.6 ~ 0.8 mm)、Inflation (0.06 ~ 0.08 mm); 定义第一层高 (first layer thickness) 为 0.08 mm, 这是边界层主要为计算湍流等大流动梯度变化而设置, 共计 5 层; 命名各个面分别为 in、out、wall。经过网格划分后的喷嘴模型节点总数 (nodes) 为 15 万左右, 单元格数 (element) 为 40 万 ~ 50 万, 三入口旋流喷嘴的网格划分如图 2。

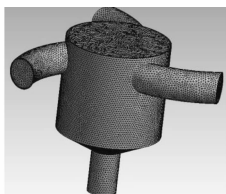


图 2 网格划分图



图 3 边界层图

选用 VOF 模型, 算法采用 SIMPLEC, 并利用二阶方法进行计算<sup>[11-12]</sup>。喷嘴中有液体 (模拟中设定水) 和气体 (空气) 两相, 选用速度入口, 设定初始入口速度为 5 m/s, 入口处空气的体积分数 (air volume fraction) 设定为 0, 即全部是液体流入, 出口为压力出口, 设定出口压力为 0 MPa, 出口空气体积分数设定为 1, 即存在空气回流。其中入口处的湍流强度 (turbulent intensity) 设定为 6%, 水力直径为入口直径总和, 出口处湍流强度低于入口处, 为 4%, 回流水力直径设定为稍小于出口直径的值, 定义出口回流直径为出口直径的一半。

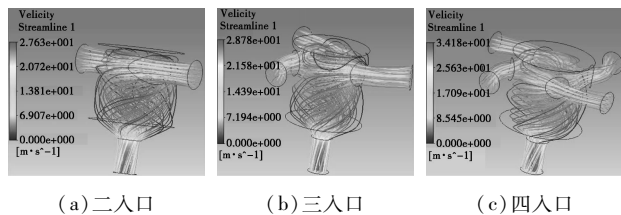
另外, 在 FLUENT 板块中进行模拟计算, 主要包括 3 个部分 Problem Setup、Solution、Results。在 Solution 中设定 Pressure (0.3)、Body Force (0.9)、Volume Fraction (0.4)、Density (0.9) 以及 Turbulent Viscosity (0.9) 等, 并设定滞留残差 (即残差收敛值) 为  $10^{-3}$ 。

## 3 结果分析

在本次模拟中, 全部选用圆形入口的喷嘴进行模拟, 因为圆形入口流体阻力小, 流体流动时几乎没有滞留区, 模拟效果比方形与梯形入口的好。

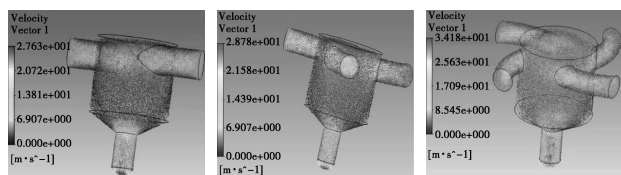
### 3.1 喷嘴入口个数对流体的影响分析

从左至右观察图 4 中 (a)、(b)、(c) 迹线图, 可以发现, 二入口、三入口以及四入口喷嘴的出口处, 即在出口喉颈段多为较大速度区域, 为 28 ~ 34 m/s; 再对比整体的速度矢量图 (图 5), 发现各喷嘴旋流室内整体流动状况良好, 旋转充分并且速度分布均匀, 即在旋流室中的旋转速度就可以达到 13 ~ 17 m/s。这说明旋流型喷嘴确实能够提供周向速度, 并且整个喷嘴内部流体也沿着轴向运动, 从而保证了喷嘴的连续喷射, 不会在喷嘴内部由于紊流而造成较大能量损失。



(a) 二入口 (b) 三入口 (c) 四入口

图 4 迹线图



(d) 二入口 (e) 三入口 (f) 四入口

图 5 整体速度矢量图

图 6 中各图出口速度都很大, 从左至右 3 幅图的速度分布梯度不是很大, 在喷射出口处为 16 m/s 左右, 中段为 22 m/s 左右, 中段散射速度可以达到 28 m/s 左右, 速度都比较理想, 但是在喷射段的雾化角度有一定差别, 在 (a)、(b) 中雾化角较小, 自然地其雾化效果就不会很理想, 在 (c) 中雾化角度稍大, 其中雾化角度 (a)  $\approx$  (b) < (c), 图 6 (c) 的雾化效果优于图 6 (a)、(b)。

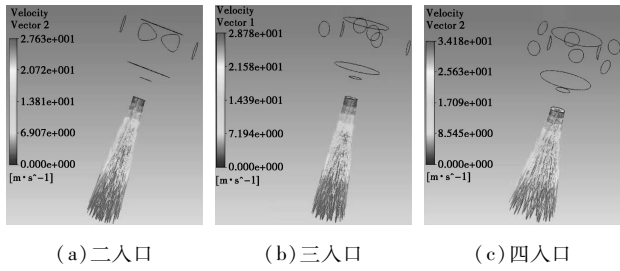


图 6 出口速度图

雾化角度对烟道气的吸收有很大的影响,在一定范围内,雾化角度越大,与烟道气接触的面积就越大,越有利于烟道气的吸收,进而提高脱硫效率。通过对喷嘴个数因素的分析,大致推断在相同条件下,四入口喷嘴的出口速度以及出口喷射段的雾化角是比较理想的。

### 3.2 加入扩张角对喷嘴性能的影响分析

在前面喷嘴尺寸参数不变的基础上,在喷嘴出口喉颈段加入 30° 扩张角,对比不同入口个数下喷嘴的出口处的速度矢量图以及周向的速度云图(图 7)。

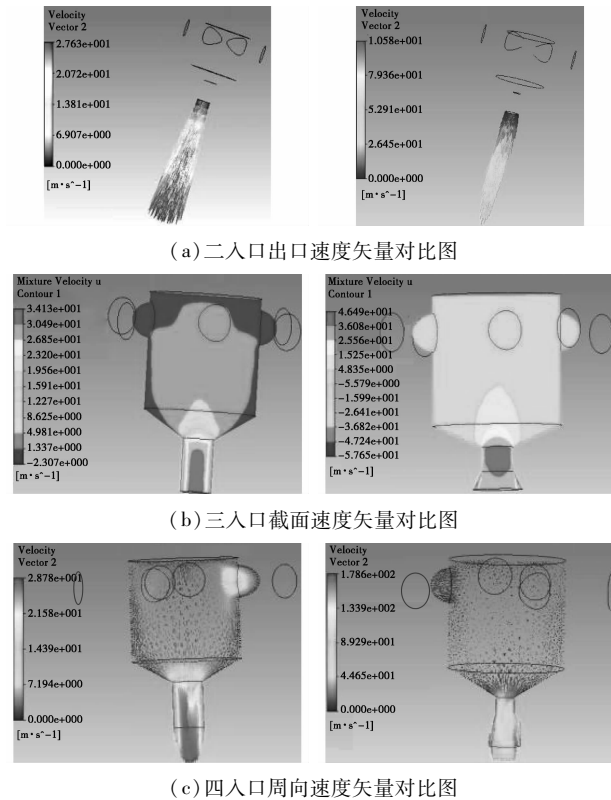


图 7 不同入口个数下喷嘴出口处速度矢量图及周向速度云图

在图 7(b) 中清楚地看到,出口为直段的三入口喷嘴图中,旋流室部分的迹线分布均匀,流体流动良好,速度变化梯度不大,旋流平均速度为 7 ~ 14 m/s;在有扩张角的喷嘴中,旋流室中的旋转比较充分,速

度非常均匀,大致在 20 m/s 左右。在出口段,左图中速度优势明显,即出口速度约为 25 m/s,右图中速度较低

根据图中左侧的标尺可以大概估算出出口的平均速度大于直段喷嘴速度。在(c)中流体旋转充分,加入扩张角后整体速度较无扩张喷嘴大一些,所以说,在速度方面,加入扩张角还是比较有优势的。

综合比较得到,在入口流道个数不同的喷嘴下,在喉颈处加有扩张段对整体速度的增大有正作用,使得出口段的周向速度减小,可以达到增压的效果,即有利于喷射液体在外部空气中的破碎。纵向比较在尺寸参数以及边界条件都相同的条件下,四入口旋流喷嘴加有一定扩张角的性能在雾化效果以及整体速度方面都有一定优势,

### 3.3 有无喉颈段对喷嘴的性能影响分析

在接下来的模拟中,将扩张角放大至 180°,即分析无喉颈段四入口旋流喷嘴综合性能。

由图 8 各向速度云图可以看到,喷嘴旋流室中流体旋转充分,速度均匀,出口处速度合适,在图 9 中可以看出,在没有喉颈段的情况下,喷嘴出口喷射段的雾化效果很好,雾化角度很大,速度也相对理想,可以达到 24 m/s 左右。

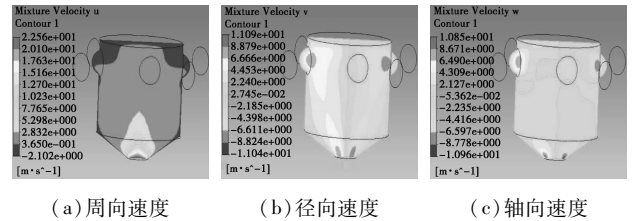


图 8 速度云图

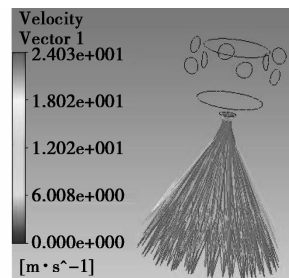


图 9 无喉颈段喷嘴出口速度图

经过上述几组喷嘴的模拟,最终发现无喉颈段四入口旋流喷嘴无论在整体速度、出口速度以及喷射的雾化角度方面,其综合性能都比较理想,因此,在化工生产中可以大量利用此种喷嘴,对提高脱硫效率、保护环境将会有重大的意义。

## 2 Sketchup 三维配管用于丙炔醇项目

东北制药设计有限公司丙炔醇项目是一个典型的精细化工项目,设备多,管道十分复杂,常规的二维 CAD 配管极易出错,经综合考虑采用了 Sketchup 和二次开发的配管插件进行三维配管。插件由 3 部分组成,管件三维信息模型库、快速配管工具、出图和材料统计功能。

### 2.1 管件参数化三维信息模型库的建立

进行三维配管,建立管件的三维模型库是必须的工作,采用 B/S 构架和云端数据服务器创建了参数化三维信息模型库管理系统,充分利用了 Sketchup 的动态模型功能,实现了参数化加动态模型技术,并将信息直接附于模型之上(如图 1),与目前的三维设计解决方案相比,具有鲜明的特色与优势。

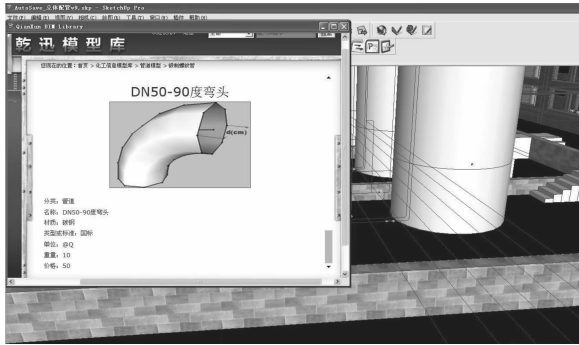


图 1 在 Sketchup 中引用模型库界面

(1)采用云端服务器的方式,模型和信息都放在专门的服务器上,设计软件直接联网调用,模型库由专人负责,可以方便地升级和维护。模型库面板与 Sketchup 可以无缝整合,直接在库中调用元件,非常方便。

(2)采用参数化加动态模型技术建模方式,每一类型的管件只需要建立 1 个模型,关键尺寸和外观可以通过参数来调整,在保证模型准确形象、易于创建的基础上解决模型数据量大的问题,目前几乎所有的三维化工配管设计软件都采用纯参数化数据库方式来解决标准模型库,元件都由标准几何体构成,建模困难,模型不够准确形象,难以实现复杂元件的建模,采用动态模型技术则可解决这些问题。

(3)信息化模型技术,模型库的信息可以很灵活地扩展,根据需要加入单重、价格、生产厂商等信息,这些信息会附在模型上,可以随时进行检视。

### 2.2 配管插件功能介绍

配管插件根据需要实现了快速配管建模的一系列功能,配合以 Sketchup 的智能定位功能,可以实现管道的快速创建,大大地提高了工作效率。Sketchup 平台本身就带有很多非常简单实用的功能,如智能定位到中心、原点、端点,对坐标轴进行锁定,快速地复制和阵列。充分地利用这些功能可以大大提高操作速度。

配管插件实现了线自动成管、插入管件、管道智

(上接第 161 页)

## 4 结论

(1)喷嘴入口流道个数为 4 时,喷嘴整体的速度较大,较为理想,出口喷射段的雾化角度较大,雾化效果相对较好。

(2)在入口流道个数不同的喷嘴下,喉颈处加有扩张段对整体速度的增大有正作用,使得出口段的周向速度减小,可以达到增压的效果,即有利于喷射液体在外部空气中的破碎。

(3)四入口无喉颈段喷嘴增压减速效果明显,速度理想(24 m/s 左右),在流体喷射段的雾化角度大,可以与烟道气充分接触,综合性能优越。该参数下的喷嘴如能在脱硫产业中广泛使用,将会对脱硫效率的提高起到促进作用,与此同时为化工生产带来动力。

### 参考文献

[1] 吴忠标. 大气污染控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

- [2] 张基伟. 国外燃煤电厂烟气脱硫技术综述[J]. 中国电力, 1999, 32(7): 61-65.
- [3] 韩琪, 李忠华. 石灰石/石膏湿法烟气脱硫的化学过程研究[J]. 电力环境保护, 2002, 18(1): 1-3.
- [4] 艾育华. 喷嘴与蒸汽喷射器研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2001.
- [5] Nasr G G, Yule A J, White A head, et al. A new fine spray low flowrate, spill-return swirl atomizer[J]. SAGE, 2010, 25(9): 131-133.
- [6] 徐刚. CFD 在旋流喷嘴中设计中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [7] 罗茂蜀. 改进喷嘴结构提高喷嘴性能的探讨[D]. 重庆: 煤科院重庆分院, 2001.
- [8] 王鹏. 旋流喷嘴设计计算和两相流动模拟分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [9] 董星涛, 李超, 朱健, 等. 基于 FLUENT 低压旋流喷嘴下游流场数值模拟及分析[J]. 轻工机械, 2012, 30(5): 26-27.
- [10] 谢龙汉, 赵新宇, 张炯明. ANSYS CFX 流体分析及仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [11] 张也影. 流体力学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 156-163.
- [12] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006. ■