

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.08.011

压力旋流喷嘴内流场特性模拟研究

范 华, 杨 刚, 李 冰

(北京航天石化技术装备工程有限公司, 北京 100166)

摘要:针对通过试验研究压力旋流喷嘴获取其雾化特性成本较高、耗时长、理论计算难于实现的问题,对压力旋流喷嘴内部流动机理及雾化特性进行了 Fluent 数字模拟研究。采用了一种基于有限容积 VOF 方法对压力旋流喷嘴内部流场进行了数值模拟;捕捉了压力旋流喷嘴出口处气-液两相界面,描写了压力旋流喷嘴出口的液膜厚度,阐述了压力旋流喷嘴各截面压力场、密度场和速度场等变化规律,预测了压力旋流喷嘴雾化锥角。模拟结果表明:压力旋流喷嘴中心会产生空气芯,压力旋流喷嘴雾化锥角及液膜厚度等雾化特征可通过剖析压力旋流喷嘴出口处空气芯直径和出口处速度获得;将模拟计算的喷嘴雾化锥角与试验值进行了对比,两者基本吻合,说明 Fluent 数值模拟可作为喷嘴设计工具。

关键词:压力旋流喷嘴;数值模拟;流场特性;气-液两相流

中图分类号:TH122;TQ245.12

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)08-0838-05

Numerical investigation on inner flow field of pressure swirl nozzle

FAN Hua, YANG Gang, LI Bing

(Beijing Aerospace Petrochemical Technology and Equipment

Engineering Corporation Limited, Beijing 100166, China)

Abstract: Aiming at experimental study on the atomization characteristics of pressure swirling nozzle is high cost, long time and difficult to be realized in theoretical calculation, the internal flow mechanism and atomization characteristics of the pressure swirling nozzle were studied by Fluent digital simulation. The inner flow field of pressure swirl nozzle was simulated using the VOF model in order to investigate the flow mechanism and predict the atomization characteristics efficiently. The gas-liquid interface of the swirl nozzle exit was captured and the liquid film thickness at the outlet of nozzle was described. Variation of the different section fields of pressure, density and velocity in the nozzle was analysed and the spray cone angle of nozzle was predicted. The simulation results show that air core is created at the center of the pressure swirl nozzle and the out side atomization characteristics such as the spray cone angle and the thickness of the liquid film can be obtained by analyzing the air core diameter and speed at the nozzle exit. The spray cone angle of the simulated is compared with the trial value, which show they are reasonable. The Fluent numerical simulation can be used as a design tool for swirl nozzle.

Key words: pressure swirl nozzle; numerical simulation; flow field characteristics; gas-liquid two-phase flow

0 引 言

压力旋流喷嘴的工作原理是由切线入口进入的液体在旋流室内大幅度的旋转流动^[1],并通过出口旋转喷出,喷出的液体与空气间发生剧烈的相互作用产生雾化锥角。其以简单的结构、良好的雾化性能、不易堵

塞、动力消耗低及低成本等特点被广泛用在石油化工、航空、淡水净化等行业。近年来,压力旋流喷嘴市场及应用的领域越来越广阔,研究压力旋流喷嘴流动机理及其雾化特征非常重要。

国内外对喷嘴的研究主要是通过试验获取喷嘴雾化特性,用于指导工程实践,但成本较高,耗时长,且喷

嘴雾化外场涉及到液膜的撕裂、破碎等问题,理论计算难于实现^[2]。由于数值模拟能够显示流动的具体过程,近年来采用数值模拟研究喷嘴逐渐成为喷嘴研究的新途径,但喷嘴内外部为气液两相流动,流场非常复杂,相关数值模拟文献报道比较少。王国辉等^[3]采用了VOF方法对含旋流导向器旋流喷嘴进行模拟,验证了该模型的可行性,并改变喷嘴的结构和尺寸分别进行模拟,得出喷嘴结构尺寸只对速度场产生影响;SOM和DATTA^[4]等采用了VOF方法对压力旋流喷嘴进行了数值模拟,分析了喷嘴不同结构的几何参数对喷嘴流场的影响。但这些研究基本集中在改变喷嘴出口结构方面。

本文将结合工程实际项目,应用数值模拟研究双进口压力旋流喷嘴内流场,剖析内流场流动机理,根据喷嘴出口处的流场特性得到其雾化特性,并通过雾化角测试试验对模拟预测的雾化角进行对照验证。

1 物理模型

笔者以扬子石化用户PTA项目的双进口压力旋流喷嘴为研究对象,喷嘴设计条件为压差0.15 MPa,介质密度1 025 kg/m³,流量2 000 kg/h(换算到同等条件下水流量为1 940 kg/h),喷射角120°,喷射形式为空锥。

其设计的喷嘴结构如图1所示。

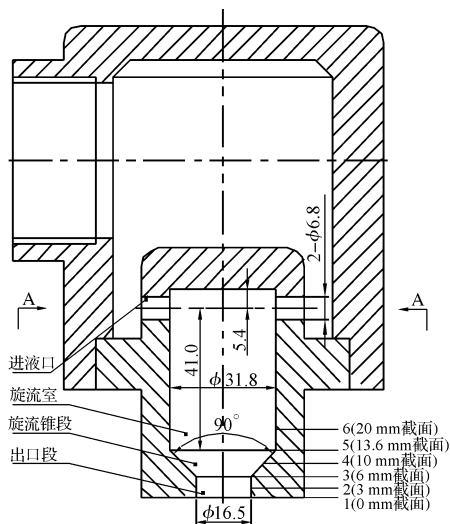


图1 压力旋流喷嘴结构示意图

液体介质由2个切向进口进入旋流室,经加速后再通过锥段旋流腔,最终从出口段喷出。

2 数值模拟

2.1 Gambit 建模

笔者利用Gambit软件按1:1比例绘制喷嘴。为

提高计算效率,仅设置喷嘴进口与喷嘴本体交界处为正四面体非结构化网格,其余部分均为正六面体结构化网格,并对喷嘴出口段进行了网格局部加密。

网格总数为174 729,节点数为132 129,网格最小体积 $2.536\ 003 \times 10^{-12} \text{ m}^3$,网格最大体积 $1.737\ 847 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ 。

三维网格划分如图2所示。

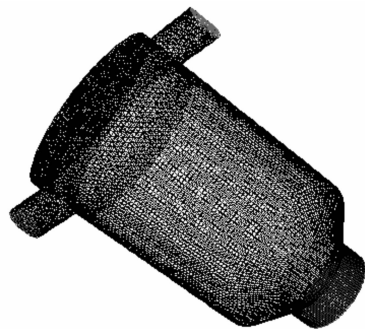


图2 喷嘴三维网格划分

2.2 计算模型

旋流喷嘴内流动为典型的气液两相流动,采用VOF模型对喷嘴内流场进行模拟^[5]。VOF模型适合于任何两种不可压及不混合且相互间的滑移可以不计的流体。其根本思想是利用一个标量场函数来表示第二流体在计算网格中的分布,其值为第二流体在网格总数中所占的百分比数。

假设气液两相之间不存在化学反应和物理相变、相间和相内无热交换,且流体流动按照不可压处理,流体湍流模型选重整化群 $k-\varepsilon$ 模型^[6-7],使用VOF模型中的Euler隐式格式处理流体体积分数 F 。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial u}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \quad (2)$$

体积分数方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

式中: ρ —密度; F —体积分数; i, j —张量符号。

其中: $\rho = F\rho_1 + (1-F)\rho_2$; $u_i = Fu_{i1} + (1-F)u_{i2}$

喷嘴两个切向进液口为进口边界条件,都设为压力入口,出口边界条件设置为压力出口,出口回流比设置为1,即回流全部为空气,使用标准壁面。

2.3 方程离散及求解

Fluent中控制体积法是将控制方程变换为可以用

数值方法求解的代数方程,在每个控制体积内积分控制方程,进而产生基于控制体的每一个变量都守恒的离散方程。

设定收敛精度 10^{-4} ,其使用的求解模型为:

- (1)采用三维分离式稳态求解器;
- (2)压力-速度耦合方式采用 SIMPLE;
- (3)方程离散格式中,考虑到流场具有旋转和高曲率的性质,压力插值采用 PRESTO^[8],体积分数用二阶迎风格式,其他方程插值都用一阶迎风格式;
- (4)为了提高收敛速度,松弛因子均取 0.2。

3 喷嘴内部流场分析

3.1 压力场分布

喷嘴内旋流场轴向剖面压力云图如图 3 所示。

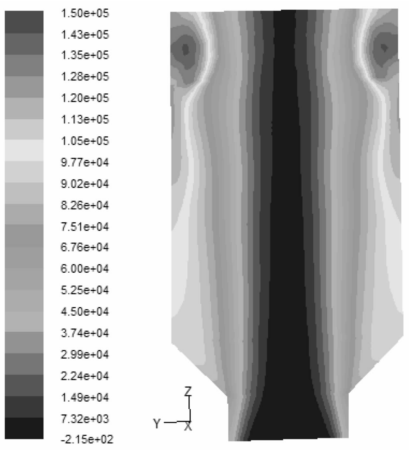


图 3 轴向剖面压力云图

从图 3 可以明显看出:喷嘴出口处会形成负压,导致外界空气被压入旋流腔内,形成空气芯,而空气芯对外场雾化特性起决定性作用。此外,压力沿半径方向由壁面向中心处依次递减,正是径向的压差提供了空气芯旋转所需要的离心力^[9],且在喷嘴壁面附近压力衰减较慢,类似对数分布,而在中心轴附近下降迅速,呈二次曲线下降。

喷嘴轴向壁面处的总压分布图如图 4 所示。

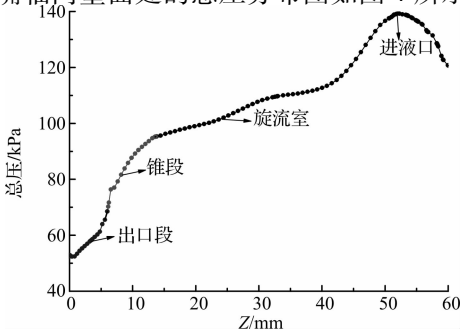


图 4 喷嘴壁面总压分布图

喷嘴的出口段、锥段、旋流室由图 4 中两条虚线区分。从图 4 可以看出:阻力下降最大的为喷嘴锥形段,主要是因为液体压头转化为动能,速度的增加加剧液体与壁面的摩擦而造成阻力损失;其次为喷嘴出口段,主要是因为流通面积的突然减小造成较大的局部阻力损失;再次为液体进口处,此处主要是因为几何尺寸的突变而产生大的压力损失。

3.2 速度场分布

喷嘴内流场的迹线图如图 5 所示。



图 5 喷嘴流场迹线图

从图 5 可以看出:其流动迹线近似为螺旋线,喷嘴内旋转流动很明显。每一流体质点速度矢量为—空间矢量,故按其 3 个分速度研究其性质,并在喷嘴旋流腔(如图 1 所示)取 6 个截面进行对比分析。

喷嘴旋流腔各截面的切向速率分布图如图 6 所示。

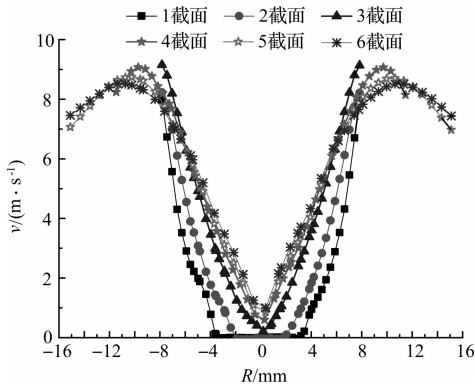


图 6 旋流腔各截面切向速率

由图 6 可以发现:在旋转半径方向,切向速率变化很显著,沿半径方向可以分为两个区域。切向速率随半径的减小而逐渐增大的区域,旋转射流理论称为自由涡区;切向速率随半径的减小而逐渐减小的区域旋转射流理论称为强制涡区。从图还可看出:涡核半径随截面接近喷嘴而逐渐减小,呈锥状式分布,如图中的虚线所示。

喷嘴不同截面的轴向速度分布图如图 7 所示。

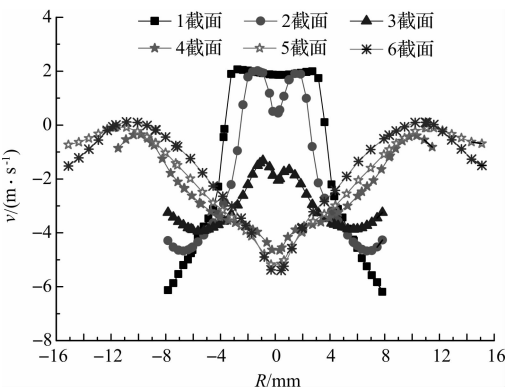


图 7 旋流腔不同截面轴向速度

从图 7 可以看出:在出口段,由于外界空气对中心形成负压区、密度较小的流体影响加剧,有部分回流出现,因此中心处轴向速度值迅速减小,并出现轴向速度正值;在锥段,受空气芯影响,越靠近出口段,其壁面附近轴向平均速度绝对值越大,而中心处附近轴向平均速度值越小,且中心处速度值变化要明显较边缘处大。

喷嘴不同截面的径向速度分布图如图 8 所示。

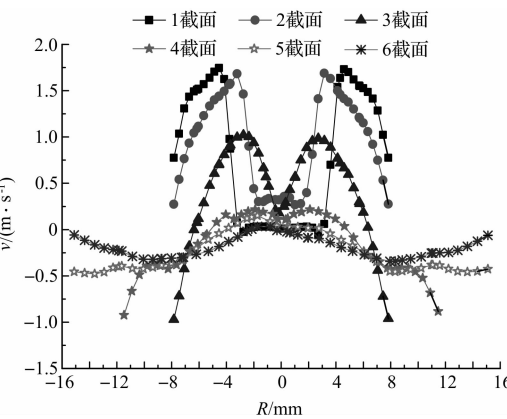


图 8 旋流腔不同截面径向速度

从图 8 可看出:出口段径向速度方向由中心指向边壁,其最大值在出口截面处;锥段速度方向由边壁指向中心,越靠近出口段,其壁面附近平均速度绝对值越大,而中心处附近平均速度绝对值越小。

4 雾化特性预测

4.1 出口液膜厚度

由上述分析可知,旋流喷嘴内部会产生空气芯。喷嘴出口液膜厚度由喷嘴出口空气芯决定,喷嘴外部雾化特征受空气芯的形状、大小的影响。

喷嘴出口(1 截面)的密度云分布图如图 9 所示。

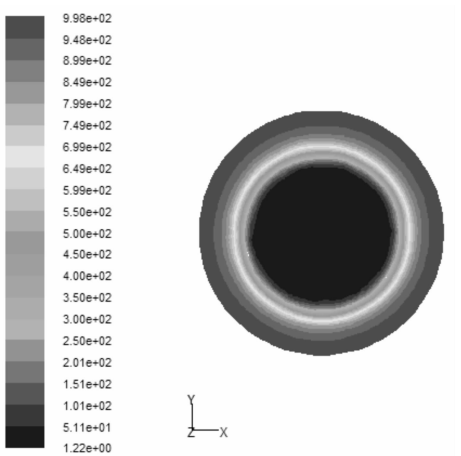


图 9 喷嘴出口密度云图

各个截面的液相体积分数分布曲线(密度场)如图 10 所示。

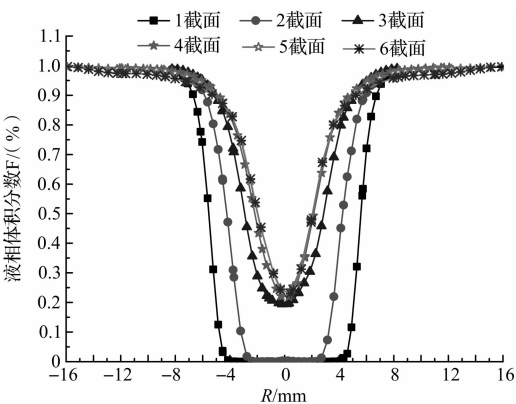


图 10 旋流腔不同截面液相体积分数

本研究将液相体积分数大于 0.5 的节点规定为液膜区域,其他区域规定为空气芯区域。从图(9,10)可以看出:喷嘴内液膜紧贴喷嘴内壁面,在中心产生空气芯,且越接近喷嘴出口,空气芯直径越大,液膜越薄。并且,由图可得出喷嘴出口液膜厚度为 2.61 mm。

4.2 雾化锥角

雾化锥角的确定引用文献[10-12]的方法,即通过喷嘴出口处液膜切向速度、轴向速度与径向速度进行计算喷嘴雾化锥角,选出口平面速度最大的节点作为雾化锥角计算点。

其雾化锥角为:

$$\theta = 2\arctan \sqrt{\frac{V_{切}^2 + V_{径}^2}{V_{轴}^2}} \quad (6)$$

根据式(6)计算喷嘴雾化锥角为 106°,喷嘴出厂前试验测试雾化角为 117°,相对误差为 9.4%。

5 结束语

针对试验研究压力旋流喷嘴成本较高、耗时长、理

论计算难于实现的问题,本文采用了一种基于有限容积 VOF 方法对压力旋流喷嘴内部流动机理及雾化特性进行了 Fluent 数字模拟研究。研究结果表明:

(1)压力旋流喷嘴工作时,液体在旋流室内沿壁面做高速旋转运动,喷嘴出口处会形成负压,导致喷嘴中心会产生空气芯,空气芯贯穿整个喷嘴,且越接近喷嘴出口,其空气芯直径越大,液膜越薄;

(2)压力旋流喷嘴内流动分为自由涡和强制涡两个区域,涡核半径随截面靠近喷口而不断减小,呈锥状分布;

(3)通过分析压力旋流喷嘴出口处空气芯直径和出口处速度,得到了喷嘴出口液膜厚度和喷嘴雾化角,并与试验对比验证,得出喷嘴雾化锥角相对误差小于 10%,说明数值模拟值与试验值基本一致,数值模拟方法可用于喷嘴设计研究。

参考文献 (References):

- [1] 孙美玲. 旋流喷嘴两相流动的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2013.
- [2] 尹俊连,焦 磊,仇性启,等. 旋流喷嘴内部流场的数值模拟和实验研究[J]. 浙江大学学报,2009,43(5):968-972.
- [3] 王国辉,蔡体敏. 一种旋流式喷嘴的实验和模拟研究[J]. 推进技术,2003,24(1):28-32.
- [4] DATTA A, SOM S K. Numerical prediction of air core diameter, coefficient of discharge and spray cone angle of a swirl

pressure nozzle[J]. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 2000, 21(4):412-419.

- [5] 王晓琦. 压力旋流喷嘴设计与实验研究[D]. 山东:中国石油大学机电工程学院,2007.
- [6] HALDER M R, DASH S K, SOM S K. A numerical and experimental investigation on the coefficients of discharge and the spray cone angle of a solid cone swirl nozzle[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2004, 28(4):297-305.
- [7] DELGADILLO J A, RAJAMANI R K. A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem[J]. **International Journal of Mineral Processing**, 2005, 77(4):217-230.
- [8] NONNENMACHER S, PIESCHE M. Design of hollow cone pressure swirl nozzles to atomize Newtonian fluids[J]. **Chemical Engineering Science**, 2000, 55(19):4339-4348.
- [9] NARASIMHA M, Mathew Brennan, HOLTHAM P N. Large eddy simulation of hydrocy clone-prediction of air-core diameter and shape[J]. **International Journal of Mineral Processing**, 2006, 80(1):1-14.
- [10] 岳 明,徐 行,杨茂林. 离心式喷嘴内气液两相流动的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2003,24(5):888-890.
- [11] 黄晓庆,张旭,张东亮. 撞击型喷嘴雾化特性的试验研究[J]. 流体机械,2016(4):1-3,16.
- [12] 尹晓奇. 离心式喷嘴空心锥喷淋特性数值研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2012.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

范 华,杨 刚,李 冰. 压力旋流喷嘴内流场特性模拟研究[J]. 机电工程,2018,35(8):◆-◆,◆.

FAN Hua, YANG Gang, LI Bing. Numerical investigation on inner flow field of pressure swirl nozzle[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018, 35(8):◆-◆,◆.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>