

# 离心式喷嘴全流场数值模拟

宋大亮, 周立新, 陈建华, 张忠利

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 将离心式喷嘴流场数值模拟由内流场扩展至外流场, 将喷嘴出口的一段区域纳入计算域, 探索用数值模拟方法研究全流场的流动特性并在此基础上对雾化特性进行分析。计算结果给出全流场的液膜形状以及气涡与液膜共存的流场结构, 直接给出雾化锥角。采用 VOF 方法捕捉气液界面, 湍流模型选择 RNG 双方程模型, 对容积分数方程选择积分平均型 TVD 格式求解, 建立离心式喷嘴全流场数学模型, 编写数值模拟程序, 运用该模型对离心式喷嘴进行全流场数值模拟研究。数值模拟结果与实验值符合较好, 验证了模型和算法的有效性。

**关键词:** VOF 法; 数值模拟; 离心式喷嘴; 两相流

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2011) 05-0036-05

## Numerical simulation of full flowfield of centrifugal nozzle

SONG Da-liang, ZHOU Li-xin, CHEN Jian-hua, ZHANG Zhong-li

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The gas and liquid flow field inside a centrifugal nozzle and in an area near the exit of the nozzle was simulated based on a CFD code developed for numerical simulation of the whole flow field of centrifugal nozzle. The geometry of the liquid film formed in the nozzle and its development after the liquid film emanating from the nozzle was predicted. The spray cone angle was directly obtained on the basis of numerical simulation. The gas-liquid interface was captured by using VOF method. The turbulence effect of the gas and liquid flow was simulated with RNG  $k-\epsilon$  two-equation model. TVD scheme was incorporated into the VOF method during the solution of the fluid volume-fraction equations. The computational results agree with the experimental measurements. The computational model and the numerical algorithm are validated.

**Keywords:** VOF method; numerical simulation; centrifugal nozzle; two-phase flow

收稿日期: 2010-12-14; 修回日期: 2011-01-20

基金项目: 总装备部预研项目

作者简介: 宋大亮 (1984—), 男, 硕士, 研究领域为推力室设计

## 0 引言

离心式喷嘴在液体火箭发动机中广泛应用,虽然对离心式喷嘴进行了大量研究,但现在用于喷嘴设计的都是经验、半经验公式,估算精度不高,设计过程需经过反复试验才能达到要求。阿伯拉莫维奇<sup>[1]</sup>对离心式喷嘴进行了理论分析,促进了离心式喷嘴的理论研究工作。随着计算流体力学的发展,研究者开始运用数值模拟方法研究离心式喷嘴的雾化特性。C.Dumouchel<sup>[2]</sup>采用涡量-流函数法对离心式喷嘴内流场进行数值模拟,作为早期的数值模拟研究成果之一,作者对数值模拟方法的应用进行了探索,但其不足之处是未对喷嘴中气液两相流动进行探讨。S.M.Jeng<sup>[3]</sup>采用ALE方法对离心式喷嘴内流场进行数值模拟,模型为放大尺寸喷嘴,对离心式喷嘴数学模型的建立起到很好的指导作用。Jian qing xue<sup>[4]</sup>用ALE方法对离心式喷嘴进行全流场

数值模拟,对离心式喷嘴全流场数值模拟进行了探索。王国辉<sup>[5]</sup>对离心式喷嘴内流场进行三维流动数值模拟研究,研究中用VOF方法捕捉气液界面。周立新<sup>[6]</sup>对离心式喷嘴内流场进行数值模拟研究。从发表文献看,国内的数值模拟研究集中在内流场,而国外已经在内流场数值模拟基础之上开展全流场数值模拟研究。孙慧娟<sup>[7]</sup>运用数值模拟方法研究离心式喷嘴入射方式对气体-液滴群掺混的影响。敞口型离心式喷嘴是气液同轴离心式喷嘴的关键部分,工程上对敞口型离心式喷嘴的特性越来越关注。

本文对敞口离心式喷嘴全流场数值模拟进行探索,模型给出全流场液膜形状及流场结构,通过数值模拟可直接给出雾化锥角。通过全流场数值模拟

对雾化特性进行分析,与实验结果进行对比。

## 1 基本方程及数值解法

### 1.1 数学模型

如图1所示,在离心式喷嘴中液体从切向孔(或切向槽)进入旋流室,在离心力的作用形成旋转液膜,液膜沿着喷嘴壁面向下流动,在出口处形成旋转雾化锥。轴线附近回流的气体随同液膜一起向外流动的气体共同构成气涡。实际喷嘴中,液体从切向孔(或切向槽)进入旋流室,在本文研究中将其简化为一个入口环带,从而将流动简化为二维轴对称流动。

喷嘴流场数学模型可描述为:

1) 流场分为气相区、液相区,气液两相存在明显的分界面;

2) 喷嘴流动简化为二维轴对称流动;

3) 喷嘴流场中气、液两相流体均是粘性流体;

4) 喷嘴流场处于湍流流态;

5) 不可压流动假设。

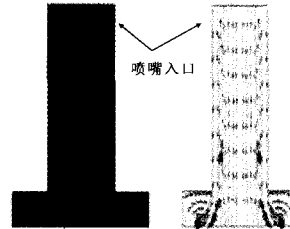


图1 流场结构

Fig. 1 Structure of flow field

### 1.2 控制方程

喷嘴流场控制方程包括连续性方程、动量方程、湍动能方程、湍动能耗散率及容积分数方程,二维柱坐标系 RNG 双方程模型的通用型控制方程如下<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{r\partial r}(\rho v\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{r\partial r}\left(r\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial r}\right) + S_\Phi$$

$$\eta_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon$$

$$G_k = \eta_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \right)^2 \right\}$$

$$c_1 = 1.42 - \frac{\tilde{\eta}(1 - \tilde{\eta}/\tilde{\eta}_0)}{1 + \beta\tilde{\eta}^3} \quad \tilde{\eta} = S k / \varepsilon \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad \tilde{\eta}_0 = 4.38 \quad \beta = 0.015 \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$c_{\mu}=0.085 \quad c_2=1.68 \quad \sigma_k=0.7179 \quad \sigma_{\varepsilon}=0.7179$$

控制方程中的密度、扩散系数按下式计算:

容积分数方程:

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}F) = 0$$

$$\Phi = \Phi_L F + \Phi_G (1-F)$$

式中:  $F$  为液相容积分数;  $\Phi_L$  为液相物性;  $\Phi_G$  为气相物性。方程组中源项见表 1 所示。

表 1 控制方程组

Tab. 1 Governing equation set

	$\Phi$	$\Gamma_{\Phi}$	$S_{\Phi}$
连续性方程	1	0	0
轴向速度方程	$u$	$\eta + \eta_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\Phi} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_{\Phi} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \rho g_x$
径向速度方程	$v$	$\eta + \eta_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\Phi} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_{\Phi} \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \Gamma_{\Phi} \frac{v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{r} + \rho g_r$
切向速度方程	$w$	$\eta + \eta_t$	$-\frac{w}{r} \frac{\partial \Gamma_{\Phi}}{\partial r} - \Gamma_{\Phi} \frac{w}{r^2} - \frac{\rho v w}{r} + \rho g_{\theta}$
湍动能方程	$k$	$\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \varepsilon$
湍动能耗散率方程	$\varepsilon$	$\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{\varepsilon}}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon)$

本文采用混合流体模型,近壁处采用壁面函数法,湍流模型选择 RNG 双方程模型,采用 VOF 方法捕捉气液界面,运用有限容积法对控制方程进行离散,对不可压流动问题采用压力修正法中的 SIMPLEC 算法求解,对代数方程组采用 ADI 和 TDMA 解法迭代求解。对容积分数方程用积分平均型 TVD 格式求解<sup>[9]</sup>,本文的求解方法可以省去复杂的拓扑结构识别过程,与施主-受主解法相比更方便向三维推广,有利于模型的进一步发展。

### 1.3 初值、边值条件

初始条件是按所研究现象在过程初始时刻的各个求解变量的空间分布。

边界条件如图 2 所示,求解区域的边界上的物理量分布。AB 和 CD 取为固壁边界条件。AG 中心轴线上取对称边界条件。BC 入口给定速度、湍动能、湍动能耗散率。FG 给定压力,参数局部单项化。DE 边界条件的取法,考虑实际实验中喷嘴出口与安装卡具之间的距离不大,故而取为固壁,这在一定程度上进行了简化,但设想应该不会对流场结构产生大的影响。EF 取为远场边界条件。

本文的喷嘴模型,入口处将切向孔(或切向

槽)简化为一个切向入口环带,在给定入口速度时,认为轴向速度为零,切向速度满足动量矩守恒,径向速度满足质量守恒,同时考虑入口处的能量守恒关系。

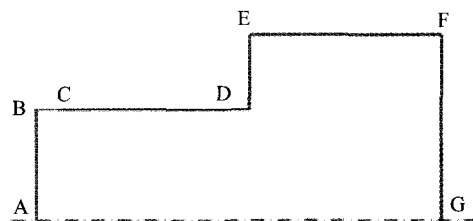


图 2 计算域

Fig. 2 Computation domain

## 2 界面捕捉验证算例

离心式喷嘴数值模拟的难点在气液界面捕捉,界面信息即是流场求解结果的一部分又是流场求解过程必须的条件。为验证本文界面捕捉方法的有效性、界面捕捉能力,编程实现方形液滴在一个给定的平移速度场中的界面捕捉问题。在完成这一验证算例时,选择与离心式喷嘴流场数学模型相同的柱坐标系。在不考虑表面张力情况

下, 由分析可知, 方形液滴应该保持其原形状。从图 3 不同时刻液滴的运动情况可以看出, 从初始时刻起, 液滴在平移速度场的所用下, 自左下角向右上角运动。该方法总体上可以捕捉运动界面, 结合文献 [1] 中关于 VOF 方法捕捉运动界面的介绍以及方形液滴界面捕捉情况, 可以认为该方法能够满足模型中气液界面捕捉的要求。

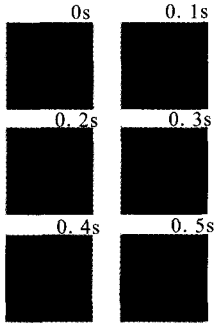


图 3 液滴运动过程  
Fig. 3 Motion process of liquid drop

3 结果与讨论

马歇尔空间飞行中心<sup>[10]</sup>对离心式喷嘴进行了一系列的实验, 水用作模拟液体, 流入周围大气中。在实验中对压降特性、质量流量、液膜厚度、雾化锥角等进行了测量。

本文选取编号为 H1 的喷嘴进行数值模拟, H1 喷嘴进口为 9 孔形式的敞口离心式喷嘴, 其切向孔直径  $\Phi 2.159\text{ mm}$ , 喷嘴直径  $\Phi 7.62\text{ mm}$ , 喷嘴长为  $139.827\text{ mm}$ , 喷嘴帽壁厚  $4.128\text{ mm}$ , 质量流量  $0.454\text{ kg/s}$ 。

表 2 中给出雾化特性数值模拟结果与实验结果的对比, 数值模拟结果可以与实验结果较好的符合。尤其是雾化锥角, 本文的模型中可以直接数值模拟给出雾化锥角, 并非以前内流场数值模拟方法中通过计算得到雾化锥角, 本文方法可能会有更好的预估效果, 通过与实验值的对比, 也证实所建模型在这方面的能力。在所建模型中将喷嘴简化为二维轴对称流动, 并未考虑切向孔 (或切向槽) 的流动情况, 这种简化对雾化锥角以及喷嘴下游的流动情况影响较弱, 但不能给出切向入口的阻力损失, 所以需要经验计算得到切向入口的压降, 总体上所建模型计算的雾化特性与实验可以较好的符合, 可以认为所建模型是可用的。在图 4 中给出数值模拟液膜厚度与实验值的对比, 在此只对喷嘴下游三维流动效应较弱的一段液膜进行比较。由于液膜厚度测量存在困难, 实验测量的液膜厚度可能存在偏差, 但是各个测点所用的测量方式是相同的, 整体的趋势应该是准确的。通过数值模拟手段给出了全流场的液膜, 将计算液膜厚度与实验测量液膜厚度进行对比, 可以看出两者有相同的变化趋势, 这进一步验证本文所建模型是合理的。实验测量给出在喷嘴出口处液膜存在减薄的趋势, 理论分析认为在喷嘴出口处势能部分转化为动能, 液膜应该有一个减薄的过程。数值模拟也给出了在喷嘴出口处液膜存在减薄的过程, 得出与实验及理论分析相同的结论, 数值模拟结果得到实验以及理论分析的证明。

表 2 数值模拟雾化特性与实验值之对比  
Tab. 2 Comparison between atomization characteristics of numerical simulation and experimental values

名 称	符号	单位	CFD	试验值	相对误差
喷嘴压降	$\Delta p$	MPa	0.3874	0.3740	3.58%
流量	$m$	kg/s	0.454	0.454	/
流量系数	$\mu_f$	/	0.3579	0.3641	-1.70%
喷雾角	$\alpha_p$	°	24.03	24.3	-1.11%
出口液膜厚度	$t$	mm	1.30	1.27	2.36%

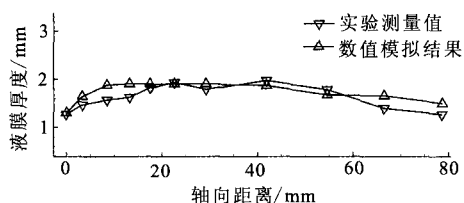


图4 液膜厚度沿轴线的变化

Fig. 4 Variation of liquid film thickness distribution along axis

文献 [10] 中通过实验证实存在一个气涡, 液膜存在于全喷嘴长度。通过本文所建模型, 数值模拟得到全流场的液膜形状, 从图 5(a)、图 5(c)可以看出气涡存在于整个喷嘴中。数值模拟得到实验中所观察到的气涡与液膜共存的流场结构。理论分析认为在喷嘴入口处, 由于径向速度较大, 同时壁面的粘附作用, 使入口处液膜较厚, 从图 5(a)中液膜的变化也看到在喷嘴入口处液膜有变厚的趋势, 数值模拟给出与理论分析相同的结论。从图 5(a)中还可以看出, 在喷嘴下游液膜变化平缓, 基本为定值, 这和喷嘴下游径向速度较小是一致的。从图 5(b)可以看出, 喷嘴中心轴线处存在负压区 (即回流区), 喷嘴内流场中气相压力变化较小, 液相与气相存在明显的压力梯度, 在喷嘴出口处压力变小较为明显, 存在较大的压力梯度。数值模拟结果给出全流场的液膜形状及流场结构, 通过数值模拟可以清晰的看到整个流场结构, 液膜的流动情况以及气液界面的信息。

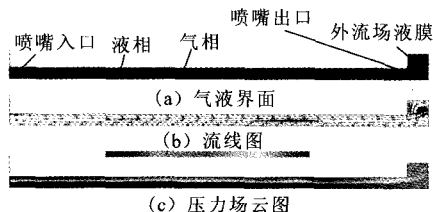


图5 数值模拟结果

Fig. 5 Results of numerical simulation

## 4 结论

### 1) 基于混合流体模型和 VOF 方法捕捉气液

界面, 本文建立离心式喷嘴全流场的数学模型, 对离心式喷嘴进行全流场数值模拟。

2) 数值模拟结果给出全流场液膜的形状及流场结构; 数值模拟结果与实验结果吻合; 数值模拟预测出喷嘴出口液膜减薄这一趋势, 这和理论分析相符; 从实验以及理论分析角度都验证了模型的有效性。

3) 本文建立的模型将离心式喷嘴流场数值模拟由内流场推进至外流场, 推动数值模拟方法在离心式喷嘴中的应用, 所建模型对进一步认识喷嘴流场结构, 提高喷嘴设计精度有益。

### 参考文献:

- [1] АБРОМОВИЧ А. Н. Прикладная газовая динамика [M]. Изд 2-е М: ГИТТЛ, 1953.
- [2] DUMOUCHEL C, BLOOR M I G, DOMBROWSKI N, et al. Viscous flow in a swirl atomizer [J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48 (1): 81-87.
- [3] JENG S M, JOG M A, BENJAMIN M A. Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simple fuel nozzle [J]. AIAA Journal, 1998, 36 (2): 201-207.
- [4] XUE Jian-qing. Computational simulation of flow inside pressure-swirl atomizers [D]. USA: University of Cincinnati, 2004.
- [5] 王国辉. 一种旋流式喷嘴的实验和数值模拟研究[J]. 推进技术, 2003, 24(1): 28-32.
- [6] 周立新. 离心式喷嘴内流场特性的数值模拟[J]. 推进技术, 2002, 23(6): 480-484.
- [7] 孙慧娟. 喷嘴入射方式对气体-液滴群掺混的影响[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(5): 238-243.
- [8] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [9] 刘儒勋. 运动界面的追踪和重构方法[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(3): 279-290.
- [10] HUTT J J, MCDANIELS D M, SMITH A W. Internal flow environment of swirl injectors [C]// Proceedings of 1994 30th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Indianapolis, IN; AIAA, 1994: 27-29.

(编辑: 马 杰)