

文章编号:1000-8055(2011)09-1986-09

基于 VOF 方法模拟离心式喷嘴内部流动过程

刘娟, 李清廉, 王振国, 吴海燕

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 基于两相界面追踪方法 VOF(volume of fluid)模拟了离心式喷嘴内部的流动过程,得到了液相填充喷嘴内部的过程,初始时刻,气液界面出现褶皱,随着进入液体的增多,褶皱逐渐消失;着重分析了喷嘴各个部位速度、压力分布,由于气液两相的存在,喷嘴内部流场变得异常复杂,流场分布不能用单相流的模式分析,总压损失大部分存在于喷嘴收缩段以及直管段,增大收缩段锥角、减小收缩段长度有利于减小总压损失;在喷嘴出口处设置一定扩张角,能够增加液相速度,减小液膜厚度,有利于雾化。

关 键 词: 流体体积法; 离心式喷嘴; 总压损失; 液膜厚度; 雾化

中图分类号: V235.21

文献标志码: A

Numerical simulation of flow field in pressure-swirl injector based on VOF interface tracking method

LIU Juan, LI Qing-lian, WANG Zhen-guo, WU Hai-yan

(College of Aerospace and Material Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Interface-tracking method volume of fluid (VOF) was used to simulate the flow process in pressure-swirl injector. The process of liquid phase filling injector was exhibited: pucker appears at first, then distinguishes with the increase of liquid. Velocity and pressure distribution were especially analyzed in different sections of injector. As both liquid and gas phase coexist in the injector, the flow field is highly complex. Total pressure loss lies mostly in the convergent and columned sections, so increasing convergent angle helps to reduce total pressure loss. Setting a divergent angle at injector exit can increase liquid phase velocity and reducing liquid sheet thickness can get better atomization finally.

Key words: volume of fluid (VOF); pressure-swirl injector; loss of total pressure; liquid sheet thickness; atomization

离心式喷嘴(如图 1 所示)是一种简单机械压力雾化喷嘴,在火箭发动机、燃气轮机、锅炉等动力设备中均得到了广泛的应用^[1]. 最早关于离心式喷嘴的论述是 1948 年阿伯拉莫维奇的理论,该理论基于最大流量原理,将喷嘴的流量系数、液膜锥角等参数表示为几何特性参数 A 的函数,该理论一直作为火箭发动机中离心式喷嘴设计准

则^[2]. 不过该理论只是对喷嘴性能的零维估计,且是基于无黏假设基础上的,并没有揭示喷嘴内部的流动过程。

近年来,随着计算流体力学的发展,尤其是两相界面追踪方法的发展,离心式喷嘴内部的流动过程得到了很好地揭示. 在众多界面追踪方法中,VOF(volume of fluid)是使用较多的一种,该方

收稿日期:2010-10-18; 修订日期:2010-12-15

基金项目:国家自然科学基金(10802095)

作者简介:刘娟(1983—),女,河南信阳人,博士生,主要从事液体燃料雾化和燃烧的研究. E-mail:janny_liu123@163.com

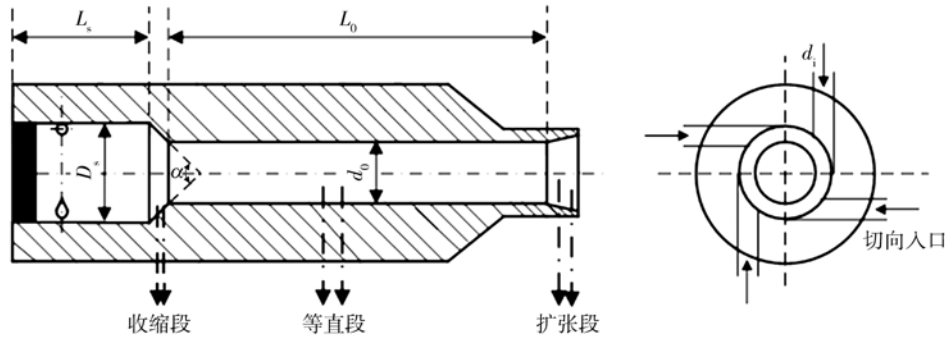


图1 离心式喷嘴结构

Fig. 1 Sketch of pressure-swirl injector structure

法最早是1981年由Hirt和Nichols^[3]提出的,随后不断地发展完善,在两相流计算中起到了重要作用。王国辉等人^[4]利用VOF方法对旋流器式喷嘴进行了试验和数值仿真研究,模拟了喷嘴内三维气液两相流动,发现旋流器的结构和尺寸对喷嘴出口参数影响较大;岳明等人^[5]用VOF方法模拟了某种离心式喷嘴内部流场,得到了不同压降下的气液两相流动;Ashraf^[6]利用该方法模拟了离心式喷嘴内部的流动过程,得到了喷嘴出口处的液膜锥角、流量系数,与试验吻合较好;Alhendal^[7]基于Fluent商业软件模拟了零重力情况下的气泡运动,得到了较好的结果,证明用Fluent进行界面追踪结果是可以接受的;在模拟气液两相界面过程中,需要对界面进行重构,赵大勇等人^[8]比较了Hirt和Nichols重构技术、FLAIR(flux line-segment model for advection and interface reconstruction)和PLIC(piecewise linear interface calculation)重构技术,认为PLIC方法界面精细度较好;Gopala^[9]比较了Flux-corrected transport, Lagrangian PLIC, CICSAM(compressive interface capturing scheme for arbitrary meshes),以及intergamma scheme几种界面重构技术,指出CICSAM和intergamma scheme方法能够保持质量守恒且界面锐利。

尽管离心式喷嘴结构简单,但是内部旋转流动以及空气核的存在使得流场变得很复杂,喷嘴内部流动属于气液两相逆向流动的环状流,与同向流动的环状流不同,在同一区域,可能发生多种流型,至今还没有对其认识清楚^[10]。

本文基于VOF界面追踪方法,CICSAM重构技术分析喷嘴内部流动过程,揭示压力损失存在的区域,目的是改进喷嘴结构,减小压降,提高流量系数,为气液同轴离心式喷嘴的研究打下基础。

1 数值计算方法

1.1 控制方程

气体、液体均可视为不可压流,相应的控制方程简化为欧拉方程。

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \\ -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{F}$ 为气液界面的表面张力,根据以下两个无量纲数考虑表面张力的取舍。

当 $Re \ll 1$ 时,考虑 $C_a = \frac{\mu U}{\sigma}$;

当 $Re \gg 1$ 时,考虑 $We = \frac{\rho U^2 L}{\sigma}$;

当 $C_a \gg 1$ 或 $We \ll 1$ 时,忽略表面张力的作用。

1.2 VOF控制方程

VOF方法具体含义是定义了一个标量场函数 α 表征第二相在计算网格内所占的体积百分含量(Fluent中定义密度较小的空气为第一相,水为第二相),当 $\alpha = 0$ 时,则网格内全部为气体,当 $\alpha = 1$ 时,则网格内全部为液体,当 $0 < \alpha < 1$ 时,网格内为气液混合物,控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{\mathbf{v}}_i) = 0 \quad (3)$$

对于两相流,流体属性通过下述方程描述:

$$\rho = (1 - \alpha) \rho_g + \alpha \rho_l \quad (4)$$

$$\mu = (1 - \alpha) \mu_g + \alpha \mu_l \quad (5)$$

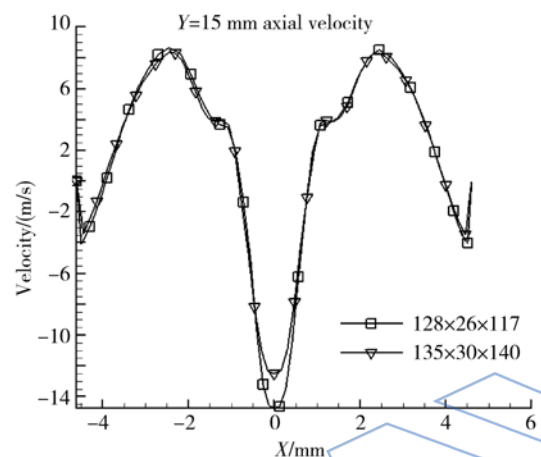
时间项采用一阶离散,为了获得高的精度,空间和体积百分含量方程采用二阶迎风格式离散。计算

中同时考虑重力影响。

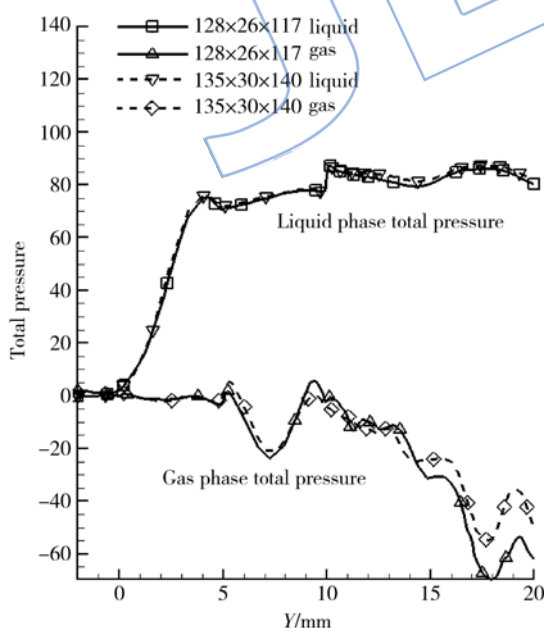
喷嘴内部的流动为强旋流,湍流模型采用 RNG(renormalization group) $k-\epsilon$ 模型。

1.3 网格及边界条件

本文采用 Gambit 软件生成网格,将切向口等效为面积相等的方形入口,比较了 $128 \times 26 \times 117$ 和 $135 \times 30 \times 140$ 网格的计算结果(如图2所示),结果显示在误差允许范围内,较粗网格 $128 \times 26 \times 117$ 能够较好地给出压力、速度分布,最终采用的网格如图3所示。



(a) 旋流室内轴向速度对比



(b) 气/液相总压对比

图2 网格无关性验证

Fig. 2 Validation of grid independent

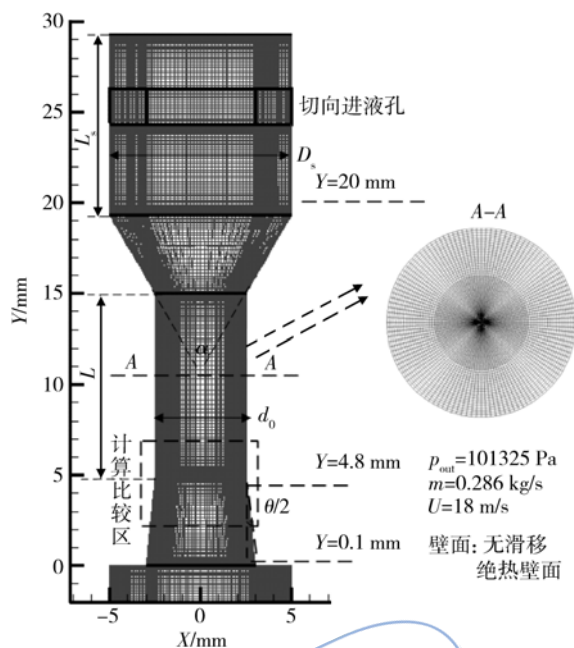


图3 计算网格

Fig. 3 Computation grid

边界条件:

入口采用速度入口,18 m/s,在入口面积不变的情况下,总流量为0.286 kg/s。

出口为环境大气,采用压力出口边界条件;

壁面为无滑移绝热壁,由于壁面附近有较大的压力梯度,因此采用非平衡壁面函数;

初始化采用入口边界条件,喷嘴内液体初始百分含量为0。

2 结果分析

基于上述控制方程和湍流模型,本文以 Fluent 软件为平台,研究了某一类型喷嘴内部流场结构(如表1),为了说明问题,又相应地增加了几个算例,除特别说明之外,喷嘴结构尺寸不变。

表1 喷嘴具体结构尺寸

Table 1 Detailed size of basic injector

D_s/mm	L_s/mm	d_0/mm	$\theta/(^{\circ})$	L/mm	$\alpha/(^{\circ})$
10	10	5	10	10	60

2.1 液体填充喷嘴过程

图4是液体填充喷嘴的整个过程。液体从4个等面积的切向进口进入喷嘴内部,贴壁面流动,在压力差的驱动下向入口的上下位置填充,随着进入液体量的增多,气体被挤压出喷嘴腔。液体在填充的过程中,界面形状是不断变化的,液体刚进入喷嘴时候,气液界面出现褶皱,当液面流出旋流

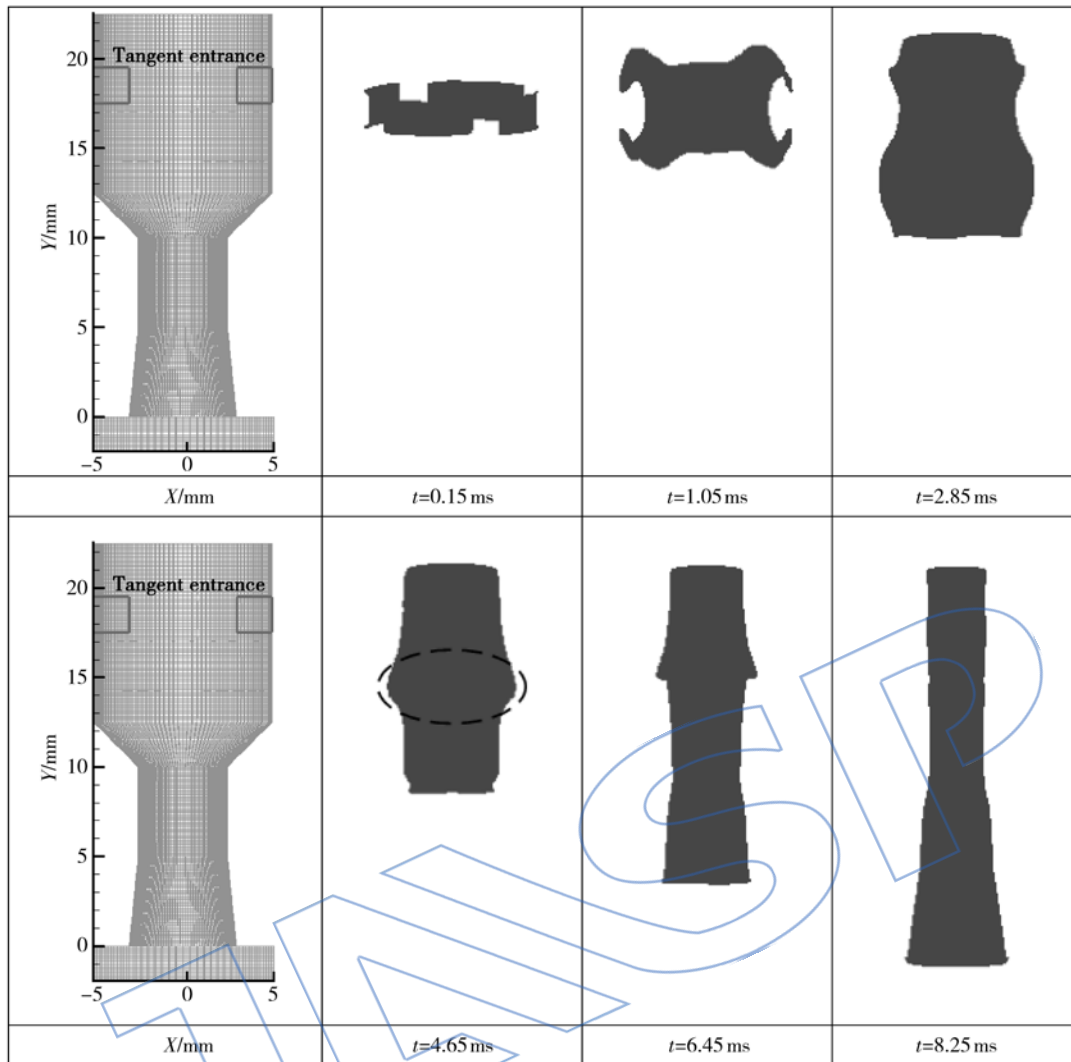


图4 液体填充喷嘴过程

Fig. 4 Process of liquid phase filling injector

室后趋于光滑,喷嘴顶部的液体向下流动,堆积所在的截面处出现鼓包,如 $t=4.65\text{ ms}$ 图中虚线所示.当液体完全流出喷嘴后,气核直径逐渐减小,液相填充喷嘴大概需要 10 ms 时间,计算稳定时,喷嘴出口等直段的气核直径要大于旋流室内部的气核直径.气核直径越大,则液膜的厚度越小,在相同流量情况下,出口速度增大,更有利于雾化.分析可知,液相下降的最快速度在 6.5 m/s ,远小于入口 18 m/s 的速度,气液界面在液体填充初期(位于旋流室时)最不稳定,发生强烈的震动,这 and 实际试验中发动机在启动过程较容易发生燃烧不稳定的现象相吻合.

图5是喷嘴内部流场,可以看出液体从切向孔进入喷嘴以后,在喷嘴上壁面附近以及入口下游壁面附近均形成了一个低速的回流区.从 $Y=$

20 mm 截面速度分布可以看出,液体在喷嘴内部顺时针转动,速度方向沿周向发生改变,但是大小不发生变化,因此下文中使用 $Z=0\text{ mm}$ 线上的速度分布代表整个流场内的速度分布是可行的.

2.2 喷嘴内部流动特点分析

喷嘴是实现液体燃料雾化的最小单元,喷嘴结构对雾化初始参数影响很大,研究喷嘴内部流动特点对掌握雾化初始参数有很大意义^[11].本节首先从旋流室内的流动分析开始,逐个分析喷嘴各部分的流动特点.

2.2.1 喷嘴内部各部分流动特点分析

2.2.1.1 旋流室内部流场分析

旋流室是液体进入喷嘴首先经过的区域,在旋流室内液体起旋,产生周向的旋转速度,由于液

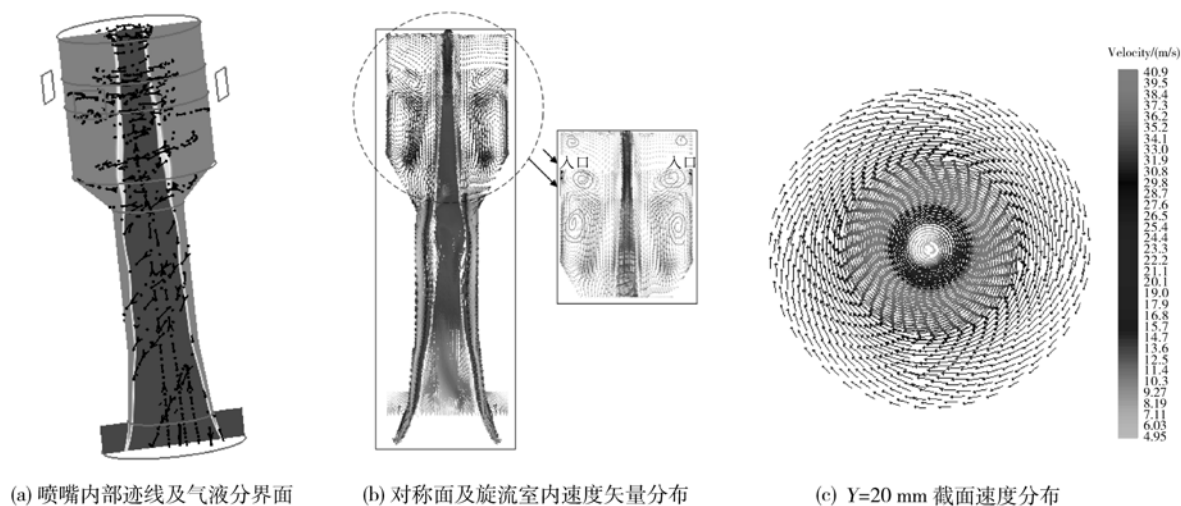


图5 喷嘴内部局部剖面流场

Fig. 5 Local flow field in injector

相和气相同时存在,使得流动很复杂.以 $Y=20$ mm 截面为例,图 6(a)给出了三维速度分布,可见,旋流室内液相的径向速度最小,平均值几乎为 0;切向速度最大,峰值速度为 38 m/s,且液相的切向速度随着直径增大而减小,根据旋转射流理论,液相位于准势流旋转区;气相的轴向速度最大,切向和径向速度几乎为 0.可见,旋流室内液相做以周向速度为主的螺旋运动,气相做垂直向上的直线运动.图 6(b)是旋流室内部的压力分布,壁面位置的总压为 2 MPa,气液分界面(液相占 0.5)处的压力为 0.2 MPa,压力差主要存在于液相,给液相旋转运动的提供向心力,由于压力梯度的存在使得喷嘴内部形成低压区,气体在燃烧室高压的作用下挤入旋流室.图 6(c)是旋流室内轴向三维速度的变化(所选位置液相体积含量为 1)从切

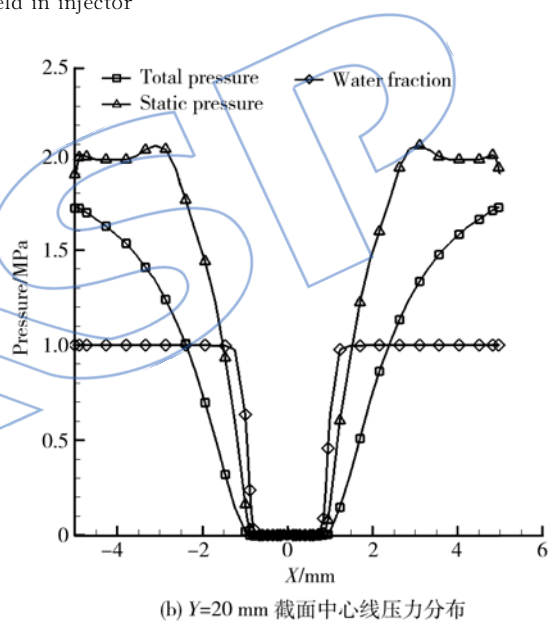
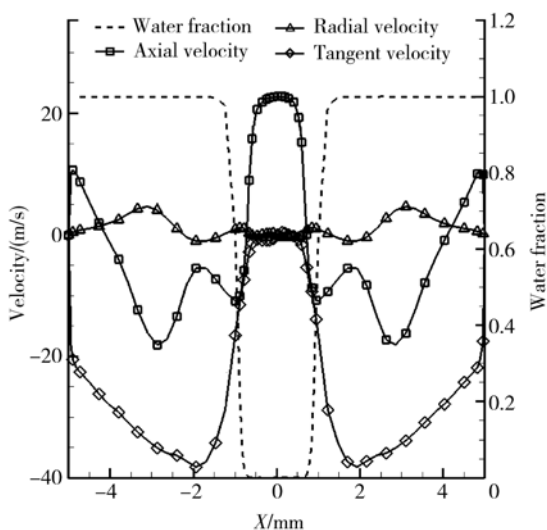
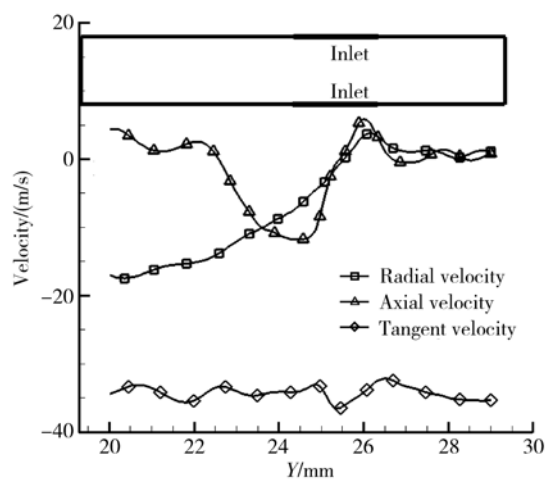
(b) $Y=20$ mm 截面中心线压力分布(a) $Y=20$ mm 截面中心线三维速度分布(c) $X=3$ mm 截面速度分布

图6 旋流室内速度、压力分布

Fig. 6 Velocity and pressure distribution in swirl chamber

向进口口向下游流动过程中,轴向速度不断增大,切向速度数值最大,不同截面处的径向速度不同,在切向入口处的径向速度达到最大,且入口附近切向速度变化较大,甚至会发生方向的改变.可见,旋流室由于气液两相的存在,且两者做方向相反的运动,使得流场非常复杂.

2.2.1.2 收缩段内部流场分析

图7是收缩段内的速度、压力分布(以 $Y=18$ mm截面为例),与旋流室的速度分布相似,液相中切向速度比其他两个方向速度大,存在较大的压力梯度;气相中轴向速度较大,切向速度很小,同时由于气相的密度较小,因此压力梯度不明显.

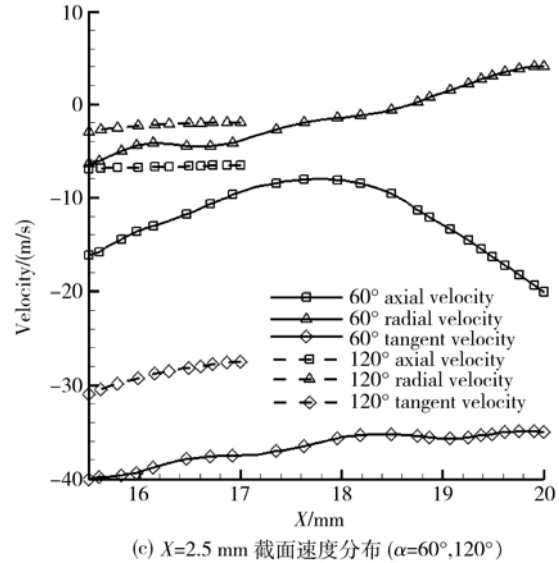
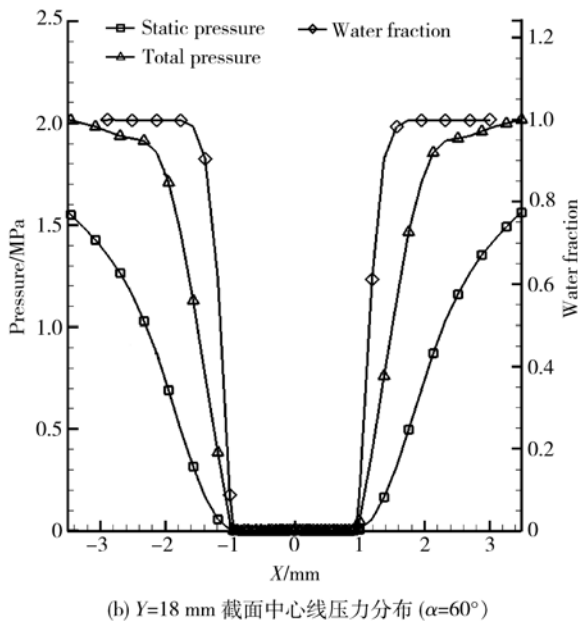
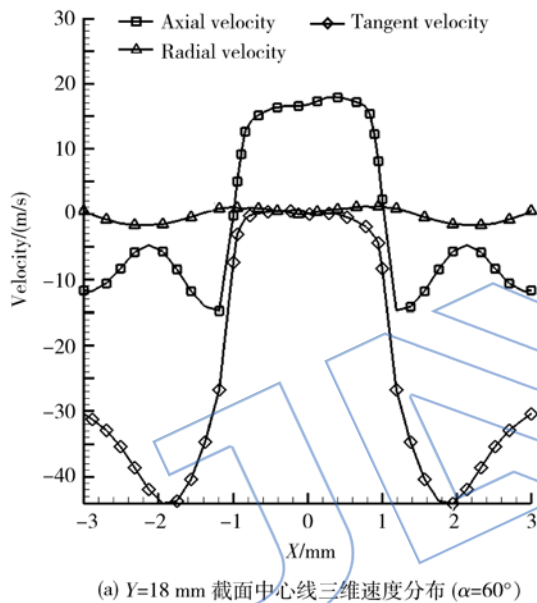


图7 收缩段内速度、压力分布

Fig. 7 Velocity and pressure distribution in convergent section

比较收缩角为 $60^\circ, 120^\circ$ 的情况,收缩角为 120° 时,三维速度变化较小,切向速度有稍微的增大;收缩角为 60° 时,切向、径向速度均增大,轴向速度先增大后减小,存在一个极大值,这主要是因为收缩角较小时,在相同的 D_s/d_0 时,高度较高,流体在收缩段内经过较长时间的运动,速度变化要大.

2.2.1.3 等直段内部流场分析

图8是等直段内的三维速度,轴向速度并不呈现单一的变化趋势,径向速度很小,切向速度逐渐减小,主要是由于两相流的变化并不像单相流一样,气液界面随时会发生变化,在流量相等的情况下,使得液相的速度发生改变.

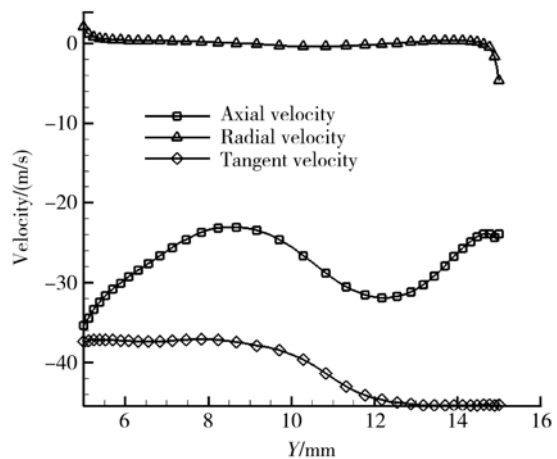


图8 等直段内部液相速度分布

Fig. 8 Velocity of liquid phase in central post

2.2.1.4 出口扩张段对喷嘴出口流场的影响

田章福^[12]指出在燃发器喷嘴出口段设置一定的扩张角具有如下好处:喷嘴出口处壁厚减小,增大了气液相互作用的强度;另外液体可以在喷嘴出口处产生一定的径向速度分量,使液膜分布的范围更广,有利于推进剂组元间的混合.以下分析喷嘴出口加入扩张角后的流场变化情况.

图9比较了喷嘴出口带/不带扩张角(10°)时内部速度、压力场.对于带有扩张角的喷嘴,在扩张段液相的轴向速度增加了1.2倍,径向速度增加了0.23倍,切向速度减小了0.68;气相的轴向速度是逐渐增大的, $Y=4.8$ mm截面的速度是 $Y=0.1$ mm截面的1.28倍,切向速度和径向速度由于本来就很小,变化不明显.喷嘴出口没有扩

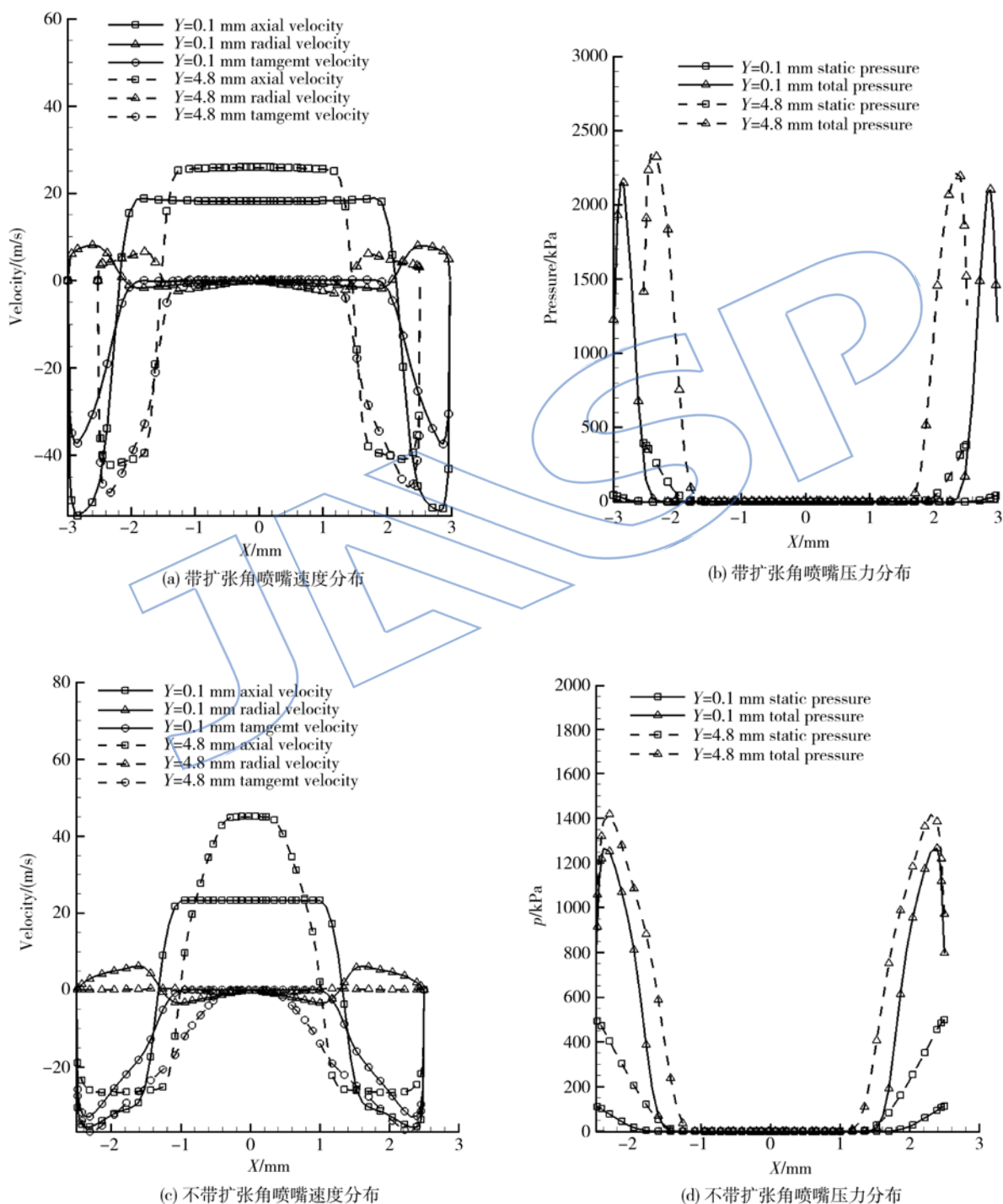


图9 带/不带扩张角时喷嘴内部流场比较分析

Fig. 9 Flow field comparison between with/without divergent angle

张角时,液相轴向速度增加了0.35倍,切向速度减小了0.16。比较两种结构下的出口速度,有扩张角的峰值轴向速度、切向速度、径向速度分别是无扩张角时的1.5倍、1.1倍、1.3倍,经过Fluent软件后处理得知相对于无扩张角喷嘴而言,喷嘴进出口的总压损失增加了15%。表2给出了喷嘴出口具体参数,带有扩张角时整个喷嘴内的气核直径较大,相应的液膜较薄,有利于雾化。

表2 带/不带扩张角时喷嘴出口参数比较

Table 2 Parameters comparison between with/without divergent angle at injector exit

	带扩张角喷嘴	不带扩张角喷嘴
液膜厚度/mm	0.3673	0.694
锥角/(°)	37	48
流量系数	0.21	0.23

2.2.2 喷嘴内部压力变化

由于喷嘴内部存在着气液两相流动,内部的压力、速度变化很复杂,不能用单相的理论解释。图10是长度 $L=5\text{ mm}$ 喷嘴沿轴线各个截面的面积加权平均压力,可看到在收缩段是压力变化最快的地方,总压的46.7%损失在该地方。因此可以推测,在旋流室和直管段直径尺寸不变的情况下,增加收缩段角度,即减小收缩段长度能够减小压降,减小总压损失。

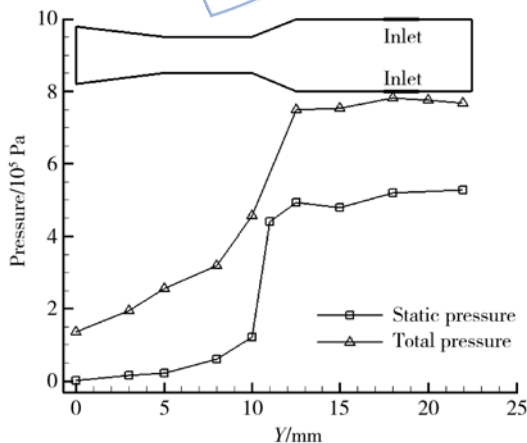


图10 $L=5\text{ mm}$ 喷嘴内部不同截面压力变化

Fig. 10 Facet average pressure distribution in injector $L=5\text{ mm}$

3 结论

本文基于两相界面追踪方法VOF模拟了离心式喷嘴内部的流动过程,了解了液体填充喷嘴的非定常过程,认清了喷嘴内部的流场结构,初步分析了内部压力损失存在的区域,创造性地在喷嘴出口设置一定的锥角,比较分析了扩张角对喷嘴参数的影响,为改进喷嘴结构提供了一定的依据。

1) 液体填充喷嘴是非定常的过程,在旋流室内气液界面出现褶皱,随着液体进入量的增大,界面逐渐光滑。在液体入口速度 18 m/s 情况下,需要 10 ms 时间填充完毕。

2) 由于喷嘴内部存在着气液两相流,内部流场不同于单相存在时情况,在喷嘴直管段速度、压力也发生较大的变化;

3) 喷嘴收缩段是压力变化最快的地方,接近一半的总压损失在该处,在旋流室以及直管段直径不变的情况下,增加收缩段的锥角、减小收缩段的长度有利于减小总压损失;

4) 喷嘴出口增加扩张角,使得峰值的轴向、切向以及径向速度都增加,液膜厚度减小,有利于雾化。

参考文献:

- [1] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 朱宁昌,刘国球. 液体火箭发动机设计(上)[M]. 北京:宇航出版社,1994.
- [3] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [4] 王国辉,蔡体敏,何国强,等. 一种旋流式喷嘴的实验和数值研究[J]. 推进技术, 2003, 24(1): 28-32.
WANG Guohui, CAI Timin, HE Guoqiang, et al. Experimental and numerical investigation of a swirl atomizer[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 24(1): 28-32. (in Chinese)
- [5] 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.
YUE Ming, XU Xing, YANG Maolin. Numerical study of two-phase flow in atomizer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(5): 888-890. (in Chinese)
- [6] Ibrahim A A, Jog M A. Nonlinear breakup model for a liquid sheet emanating from a pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(4): 945-953.
- [7] Alhendal Y, Turan A, Aly W A. VOF simulation of marangoni flow of gas bubbles in 2D-axisymmetric column

- [J]. *Procedia Computer Science*, 2010, 1(1): 673-680.
- [8] 赵大勇, 李维仲. VOF 方法中几种界面重构技术的比较[J]. *热科学与技术*, 2003, 2(4): 318-323.
- ZHAO Dayong, LI Weizhong. Comparison of three kinds of interface reconstruction methods applied to VOF[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2003, 2(4): 318-323. (in Chinese)
- [9] Gopala V R, Van Wachem B G M. Volume of fluids methods for immiscible-fluid and free-surface flows[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 141(1-3): 204-221.
- [10] 阎昌琪. 气液两相流[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
- [11] 李清廉. 同轴式三组元喷嘴性能分析、工程应用及设计评定[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- LI Qinglian. Performance analysis, engineering application, design and evaluating of coaxial tripropellant injector [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- [12] 田章福, 吴继平, 陶玉静, 等. 气液同轴式喷嘴雾化特性的试验[J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(4): 10-13.
- TIAN Zhangfu, WU Jiping, TAO yujing et al. Experimental study of atomization characteristics of liquid-gas coaxial atomizer[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(4): 10-13. (in Chinese)

JALSP