

离心式喷嘴充填过程内部流动特性仿真

陈慧源^{1,2}, 康忠涛^{1,2}, 成鹏^{1,2}, 李清廉^{1,2}

(1. 国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073;

2. 国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073)

摘 要: 基于两相界面追踪方法 VOF(volume of fluid)模拟了离心式喷嘴充填过程中的内部流动特性。研究了气液界面随时间的变化过程,发现了充填过程中气核收缩和旋转液膜的现象;通过提取气相体积分数等值线的方法计算了充填过程中喷嘴出口液膜厚度和喷雾锥角的变化。结果发现:液膜厚度随出口流量的增大而增大,出口喷雾锥角随出口流量的增大而减小;描述了喷嘴旋流室内的回流现象,分析了充填完成后的压力场和速度场分布,发现在压降和气液作用的共同影响下,中心气核轴向速度沿轴向先增后减。

关 键 词: 充填过程; 内部流动特性; 离心式喷嘴; 数值仿真; 流体体积法

中图分类号: V235.21

文献标志码: A

Simulation of inner flow characteristics of swirl injector during the filing process

CHEN Huiyuan^{1,2}, KANG Zhongtao^{1,2}, CHENG Peng^{1,2}, LI Qinglian^{1,2}

(1. Science and Technology on Scramjet Laboratory,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Inner flow of fluid (VOF) method was applied in the simulation of inner flow characteristics of a swirl injector during the filling process. The resolution of the phase interface was investigated, the phenomena of the shrink of air core and the rotation of liquid film were discovered. The changes of liquid film thickness and spray angle at the injector outlet during the filling process were calculated by extracting the contours of gas phase volume fraction. The results showed that the liquid film thickness increased along with the outlet mass flow rate, while the spray angle decreased. Besides, the circumfluence in the swirl chamber was described, and the pressure field and velocity field were analyzed, indicating the change of the axial velocity was attributed to the co-effect of pressure drop and gas-liquid

收稿日期: 2016-10-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(613239); 国家自然科学基金(11472303,11402298);

新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0156)

作者简介: 陈慧源(1992—),女,博士生,主要从事液体火箭发动机喷雾燃烧研究。E-mail:catherinechy@163.com

通讯作者: 李清廉(1974—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事液体火箭发动机喷雾燃烧研究。E-mail:peakdreamer@163.com

引用格式: 陈慧源,康忠涛,成鹏,等. 离心式喷嘴充填过程内部流动特性仿真[J]. 航空动力学报,2018,33(4):944-951. CHEN Huiyuan,KANG Zhongtao,CHENG Peng,et al. Simulation of inner flow characteristics of swirl injector during the filing process[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(4):944-951.

interaction.

Key words: filing process; inner flow characteristics; swirl injector; numerical simulation; volume of fluid (VOF)

离心式喷嘴是一种压力雾化喷嘴,在包括农业、燃油机、加湿器和空调领域^[1]都有广泛应用,并于 1902 年被 Korting 引入到了燃烧领域^[2]。阿勃拉莫维奇根据最大流量假设^[1],提出了离心式喷嘴的经典公式,定量描述了流量系数、锥角与几何特性 A 的关系,是离心式喷嘴设计的重要准则^[3]。但该经典理论并未考虑喷嘴内包括填充过程在内的动态工作过程。而喷嘴的填充是喷嘴流量和压力的建立过程,在此期间流量、喷雾锥角、液膜厚度等均经历了由变化到稳定的过程,直接影响喷嘴最终的稳态工作,故有必要对喷嘴的充填过程进行研究。

在充填过程中,尚未形成完整稳定的锥形液膜。故本文主要研究了喷嘴的内部流动特性。这是一个典型的多相流问题,喷嘴内流体由气液两相构成。对于喷嘴内部相界面的追踪, Kim 等^[4]提出里一种电导法来测量液膜厚度并将该方法用于喷嘴喷雾动态特性的研究^[5],但该方法对设备复杂,且作为一种接触性测量方法,可能会对流场造成一定的影响。同时不能反映出流场变化的细节。故本文通过 VOF 仿真手段对内部流场展开研究。该方法最早由 Hirt 和 Nichols 提出,在两相流计算中起到了重要作用^[6]。

对喷嘴内部流动的研究中,除了对喷嘴内三维气液两相流的研究^[7]外,液膜厚度和喷雾锥角是两个常见的参数。王成军等^[8]验证了 VOF 仿真对于提取气液截面的可行性。岳明等^[9]发现液膜厚度随压力增大而减小,与试验所得趋势吻合较好。刘娟、宋大亮等^[6,10]在数值模拟中将喷嘴出口的一段区域纳入计算区域,探索了用数值模拟研究全流场流动特性的方法。王成军等^[8,11]还通过观察喷嘴出口气相体积分数分布范围的方法判断了喷雾锥角的变化,发现压力对雾化锥角影响不大;岳明等^[9]发现随着入口压力的增加喷嘴出口速度增加,但对喷嘴雾化角影响较小。此外,刘娟等^[12-13]较为系统地研究了离心式喷嘴结构参数对于液膜厚度的影响, Wang 等^[14]的研究则认为增大几何特性系数会导致液膜厚度的降低,但压降变化对液膜厚度几乎没有影响。

1 数值计算方法

1.1 研究对象

本文研究的对象是一个有 4 个切向孔入口的离心式喷嘴,设计质量流量为 232 g/s。喷嘴由旋流室、收缩段、等直段和扩张段构成,其结构如图 1 所示,主要的结构参数如表 1 所示。本文主要关注离心式喷嘴在充填过程中两相流及流场的建立过程,为此在 Fluent 平台展开开展内部流场的仿真研究。液体由喷嘴出口流出后,以液膜的形式继续向下流动。为捕捉喷嘴出口的近场流动,数值计算时在喷嘴出口加入了一段长度为 10 mm,半径为 15 mm 的圆柱形计算域,设定为压力出口。计算域的原点位于实际喷嘴出口的中心位置, y 轴为喷嘴的中心轴。下文将具体介绍计算模型和参数条件的设置。

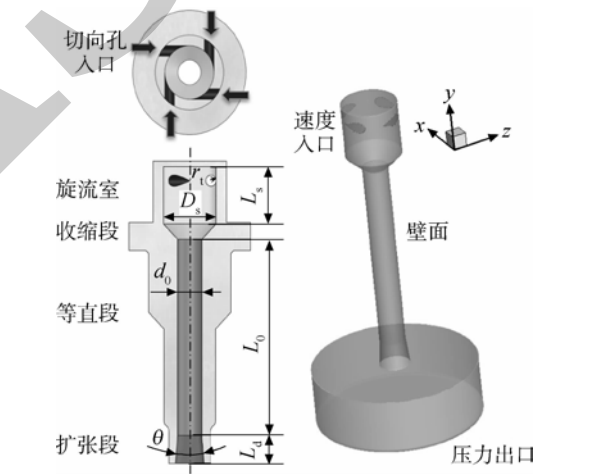


图 1 喷嘴结构示意图
Fig. 1 Sketch of injector structure

表 1 喷嘴的主要结构参数
Table 1 Main structure parameters of the injector

D_s /mm	L_s /mm	d_0 /mm	L_0 /mm	r_t /mm	$\theta/(^\circ)$	L_d /mm
10.2	10.2	4.7	35.0	1.0	10	5.0

1.2 控制方程

本文的控制方程基于经典的 Navier-Stokes (N-S) 方程^[15],由于所研究问题中未涉及能量变化,故只用到了质量方程(1)和动量方程(2)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{cases} \rho \frac{Du}{Dt} = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\mu \operatorname{div} \mathbf{u}) \\ \rho \frac{Dv}{Dt} = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\mu \operatorname{div} \mathbf{u}) \\ \rho \frac{Dw}{Dt} = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\mu \operatorname{div} \mathbf{u}) \end{cases} \tag{2}$$

相设置上以空气(air)为基本相,液体水(liquid water)为第二相。湍流模型采用 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 二阶模型,基于压力隐式求解。非稳态求解时间步长为 10^{-5} s。

1.3 网格划分

本文采用 Gambit 软件生成网格,对喷嘴内部进行了全尺寸的网格划分以更好地模拟三维流动特性。对几何结构和流动相对复杂的旋流室和收敛段采用四面体的非结构网格划分,对等直段及收敛段和出口计算域采用六面体的结构网格划分,如图 2 所示。

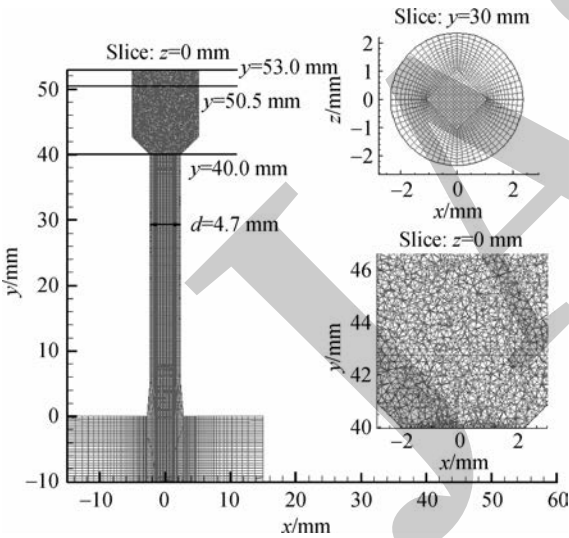


图 2 计算网格

Fig. 2 Computation grid

1.4 边界条件

图 1 给出了数值计算中边界条件的类型及对应区域。计算时,水以液相形式经切向孔入口进入原本充满气体的喷嘴中。边界条件如下所示。

速度入口:根据入口流量及面积计算得到入口速度 $v=18.46$ m/s,4 个切向孔入口的速度方向则根据各切向孔的方向具体给定。湍流强度为 4.3%,具体的计算方法参见文献[16],水力直径为切向孔入口直径。入口设置为纯液相。

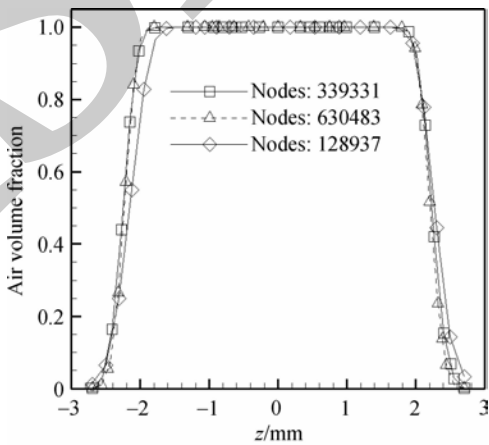
壁面:采用无滑移、无渗透固壁条件^[17],流体

黏在壁面上, $u=v=w=0$, $\partial y_i / \partial n = 0$, 并采用标准壁面函数法处理湍流问题。

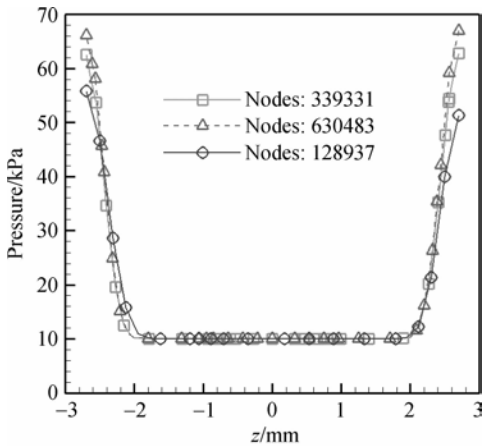
压力出口:设置出口边界的静压为零(表压,参考压力为 101 kPa)。出口为亚声速时,出口压力即为设定值;如果当地流速达到超声速,所设压力不再使用,此时的压力由流场内如通过插值外推得到^[18]。出口设置为纯气相。

1.5 网格无关性验证

为确定合适的网格量,本文比较了节点数分别为 339 331、630 483、128 937 的三套网格的计算结果(如图 3 所示),发现较密的网格量 339 331 能



(a) 气液分布沿z方向分布比较



(b) 压力沿z方向分布比较

图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Validation of grid independent

够较好地显示气液分布、压力分布,最终选择了 339 331 网格量用于数值计算。

1.6 结果验证

张新桥^[19]基于本文所用的喷嘴设计了透明喷嘴,并开展了液膜的直观测量和光学校正工作。得到了不同流量下的出口液膜厚度(如表 2 所示),并给出了有无 10°的出口扩张角的两个喷嘴的结果比较(如图 4),还得到了出口无扩张时液膜厚度随流量和压降的关系式

$$h = 0.051 \left(\frac{d_0 \dot{m} \mu_t}{\rho_l \Delta p} \right)^{0.136} \tag{3}$$

式(3)中除流量 $\dot{m}$ 和压力 Δp 外,其他量均与喷嘴结构有关,详见文献[19]。

表 2 喷嘴出口液膜厚度

Table 2 Liquid film thickness at the outlet

压降/MPa	质量流量/(g/s)	出口液膜厚度/ μm	标准误差/ μm
0.17	95.97	517.809	2.8732
0.21	103.15	508.731	3.1534
0.4	144.32	484.582	2.6746

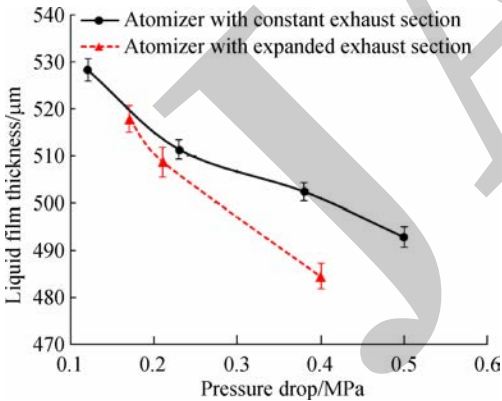


图 4 无扩张和有扩张喷嘴出口液膜厚度比较^[19]
Fig. 4 Comparison of liquid film thickness of injector with constant/expanded exhaust section^[19]

通过插值方法可以估计喷嘴流量为 0.232 g/s时,喷嘴出口液膜厚度为 0.424 mm,仿真所得的液膜厚度为 0.497 mm,与试验估测值差 17.2%,推测一个可能的原因是从图 4 可以看出液膜厚度随喷嘴流量的变化并不是一个线性的变化,斜率的绝对值会逐渐变小(也可从公式(3)中推测液膜厚度与 $\dot{m}^{-0.136}$ 成正比,斜率绝对值不断减小),故实际的液膜厚度应比直接线性插值的

0.424 mm 更大,介于 0.424~0.484 mm 之间,仿真值与实验值吻合得较好。

2 结果分析

2.1 数据处理方法

2.1.1 液膜厚度

仿真中以气相体积分数(φ)表征喷嘴流体的气液分布情况。图 5 给出了 $y=1\text{ mm}$ 截面上的气相体积分数云图。将气相体积分数为 0.5 的等值线看作气液分界面,则壁面与气液分界面之间为液膜,气相体积分数为 0~0.5;气液分界面包裹的中心区域为气核,气相体积分数为 0.5~1.0。由此可得液膜厚度的计算式

$$h_{\text{lf}} = r_w - r_{\text{ac}} \tag{4}$$

式中 h_{lf} 为液膜厚度, r_w 为喷嘴内径, r_{ac} 为气核半径。

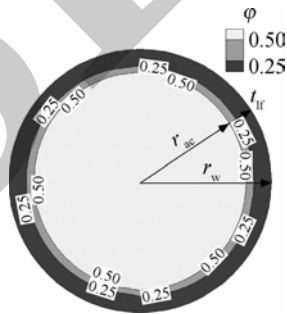


图 5 $y=1\text{ mm}$ 截面上的气相体积分数云图
Fig. 5 Gas phase volume fraction on slice $y=1\text{ mm}$

考虑到喷嘴出口 $y=0\text{ mm}$ 处涉及边界条件的变化,因而选取与出口非常接近的 $y=1\text{ mm}$ 截面计算喷嘴出口液膜厚度。气核半径通过计算气液分界面上各离散点半径的平均值可得。对每个离散点,气核半径为

$$r_{\text{ac}} = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{5}$$

式中 x 、 y 为每个点的横、纵坐标值。

对于具体的 $y=1\text{ mm}$ 截面,结合喷嘴结构参数(如表 1 所示),可以根据喷嘴等直段直径 d_0 和出口扩张角 θ 计算得到该截面的壁面半径

$$r_w = d_0/2 + (L_d - y) \cdot \tan(\theta/2) \tag{6}$$

2.1.2 喷雾锥角

根据半锥角的定义^[13]

$$\cos \alpha = u_0/U_0 \tag{7}$$

式中 u_0 为轴向速度, U_0 为合速度。

考虑到液膜区域的气相体积分数为 0~0.50,

故提取液膜中心位置,即气相体积分数为 0.25 的等值线(如图 5 所示)上的速度来计算喷雾锥角。

2.2 充填过程分析

流体由切向孔进入喷嘴后,具有初始的切向速度,并在离心力和重力的共同作用下旋转向下流动。离心力的作用使液体贴壁流动,在喷嘴中心形成低压的气核区域。图 6 给出了喷嘴充填过程的不同时刻气液分界面的发展,同时还示意了一条从切向孔入口开始的三维流线以表征液体的流动方向。随着充填过程的进行,切向速度不断向下游传播,流线也由最初向下的直线发展为旋转向下的曲线,且流线旋转方向与切向速度方向一致。

从气液界面的发展来看,在图 6(a)时刻,液

体从切向孔流入喷嘴后同时向上下两个方向充填,且在轴向分布上呈现两端凸,中间凹的特点,表明液体刚开始充填时还主要集中在切向孔平面附近区域。同时由于喷嘴在轴向上只有 4 个切向孔,液膜在周向上分布不均匀,气液分界面在周向分布上呈锯齿状。由图 6(b)至图 6(d)时刻,液体向下流动,同时更多的液体进入旋流室,气核向中心压缩。从图 6(d)时刻开始,液体开始进入等直段,气核进一步压缩。至图 6(f)时刻,气液分界面已经到达喷嘴出口,而到图 6(h)时刻,发现气液分界面上出现了明显的褶皱(图中给出了褶皱的局部放大图),这是喷嘴向下流动过程中切向速度和轴向速度共同作用的结果。

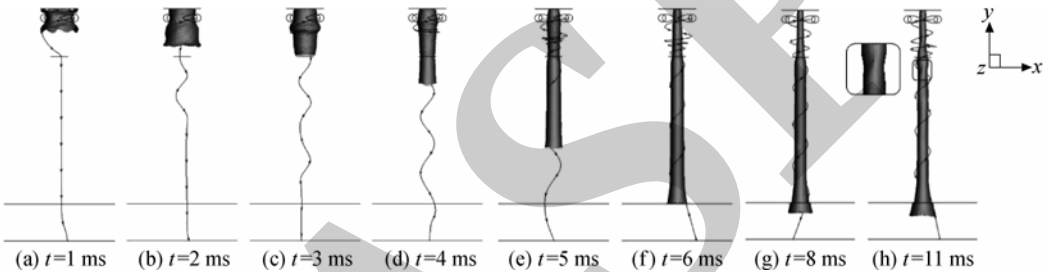


图 6 充填过程中不同时刻的气液分界面

Fig. 6 Phase interface resolution during filling process

2.3 充填过程中的出口液膜厚度及喷雾锥角变化

由图 6 可以看出,液膜在周向分布上并不均匀,具体表现为不同周向位置上的液膜不会同时到达同一轴向横截面。为研究问题方便,以气相体积分数为 0.50 的等值线判断液膜位置,发现 8 ms 后液膜到达喷嘴出口。对此后喷嘴出口液膜厚度及喷雾锥角随时间的变化进行分析,如图 7 所示。

在喷嘴出口处流量不断上升的过程中,液膜厚度也随之呈现整体增大的趋势,变化趋势与出口流量一致。出口喷雾锥角的变化则与液膜厚度及出口流量的变化趋势相反,整体上呈现随流量增大而减小的趋势,与稳态单点工况中液膜厚度随流量增大而减小,出口喷雾锥角随流量增大而增大的趋势^[9]相反。这种现象的发生是由于本文研究的是喷嘴从充填到稳态的动态工作过程,结合图 6 中充填过程中喷嘴内部液体由无到有、由少增多的变化过程,很容易理解充填过程中液膜厚度随时间变厚的趋势。

而对于喷雾锥角的变化,可以通过对速度变

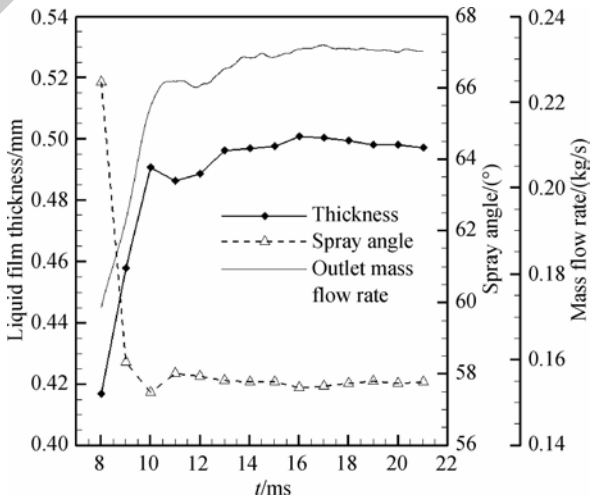


图 7 液膜厚度及喷雾锥角随时间变化图

Fig. 7 Liquid film thickness and spray angle resolution

化的分析来解释。由图 8 可以看出,在充填过程中,轴向速度 v_a 随时间有明显的增加,而切向速度 v_t 和径向速度 v_r 的变化相对较小,合速度 v_m 在充填过程中也随时间增大。式(7)半锥角的定义还可以表示为

$$\tan\alpha = \sqrt{v_t^2 + v_r^2}/v_a \tag{8}$$

由于充填过程中主要表现为轴向速度的增大,故喷雾锥角减小。约 16 ms 之后,充填过程基本完成,喷嘴进入稳态工作过程,出口流量、液膜厚度和喷雾锥角基本稳定。

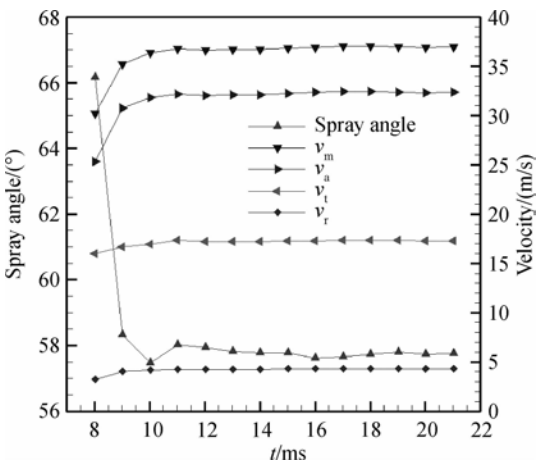


图 8 喷雾锥角及各方向速度随时间变化图
Fig. 8 Spray angle and velocity resolution

2.4 稳态工况三维内部流动分析

前文分析了离心式喷嘴的充填过程及该过程中的液膜厚度及喷雾锥角的变化,为进一步认识喷嘴内部的流动特性,下面对充填过程完成后的稳态流动进行分析。

图 9 以喷嘴收敛段与等直段交汇处 ($y = 40$ mm 截面) 的气核为例,间隔为 1 ms 给出了气核整体随时间的变化,发现气核整体近似椭圆,且呈逆时针旋转的趋势(以长半轴示意),与图 6 中显示的流线顺时针旋转方向相反。这是因为图 9 中展示的是不同时刻的气核形态,而图 6 中任意时刻展现出的流线方向是该时刻整体的流动方向。由于液体向下流动,故前一刻的液体在后一刻会流动到下游位置。由此推测在图 9 中的图 9 (d)时刻,按照从上往下的流动方向,气核的状态应该依次为图 9 (d)→图 9 (c)→图 9 (b)→图 9 (a),那么从整个喷嘴内部的流动来说,气核应该是顺时针向下旋转的,与图 6 中发现的流线顺时针向下发展吻合。

图 10 结合喷嘴纵截面上的压力分布分析了喷嘴内部的三维流动情况。可以看出,喷嘴内部的压力从中心到边缘逐渐增大,且液膜总体呈现旋转向下的流动状态。对于向上的气核,当其上升到旋流段之后,运动方向并非沿着轴向竖直向上而是略有偏离,这是因为气核向上运动的过程

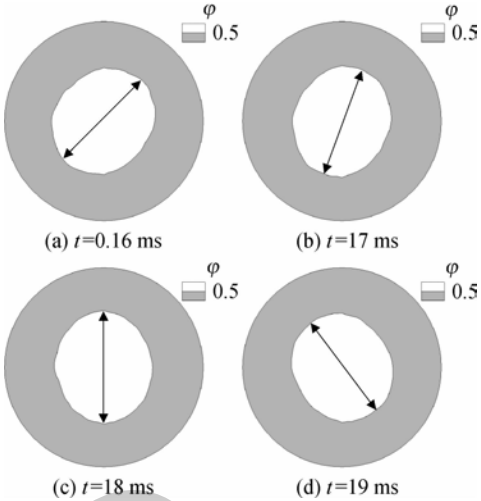


图 9 气核随时间变化图
Fig. 9 Air cone resolution

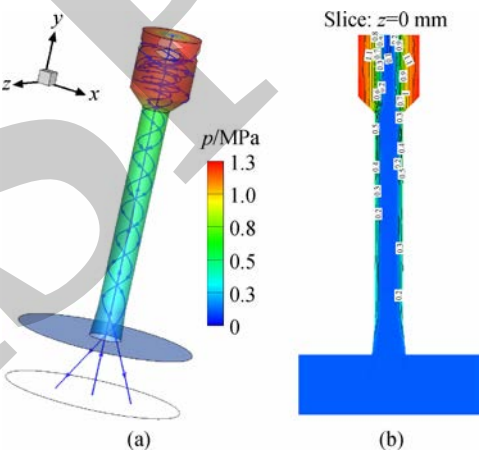


图 10 稳态工况下三维流线/压力云图
Fig. 10 Three-dimensional streamline/pressure contour under the steady condition

中由于外侧旋转液膜的带动也获得了一定的旋转动量。

为更精细地分析喷嘴内部的流动过程,在喷嘴的一个纵向截面 $z = 0$ mm 做轴向速度和气相体积分数的云图,如图 11 所示。总的来说,喷嘴中液体速度向下,气核速度向上。但喷嘴旋流室中的部分液体存在向上的轴向速度(数值为正),这些区域在图中用圆圈标出。对比右侧的流线图中可以发现,这些区域对应旋流室中的回流区。回流区主要出现在喷嘴切向孔平面到收敛段的贴壁区域。在这个区域内,由切向孔流入的液体向下运动,受到壁面阻碍后一部分流回上游,在壁面附近形成了回流现象。此外,由图 11 可以看出,喷嘴中心气核的最大的轴向速度出现在等直段上部接近收敛段的区域而并非沿轴向一直向上增大。

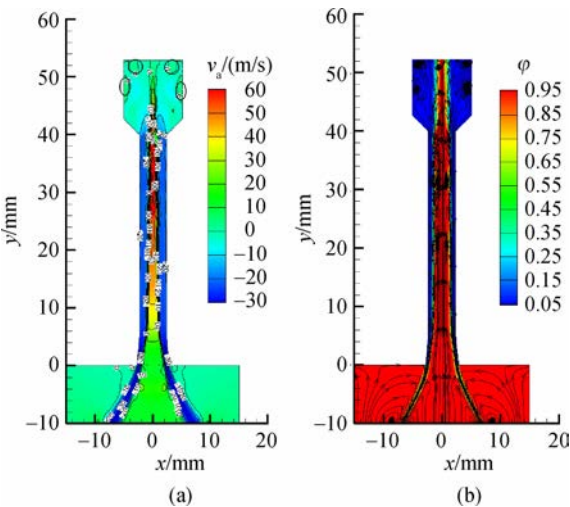


图 11 $z=0\text{ mm}$ 截面上的轴向速度及气相体积分数云图
Fig. 11 Contour of axial velocity and gas phase volume fraction on slice $z=0\text{ mm}$

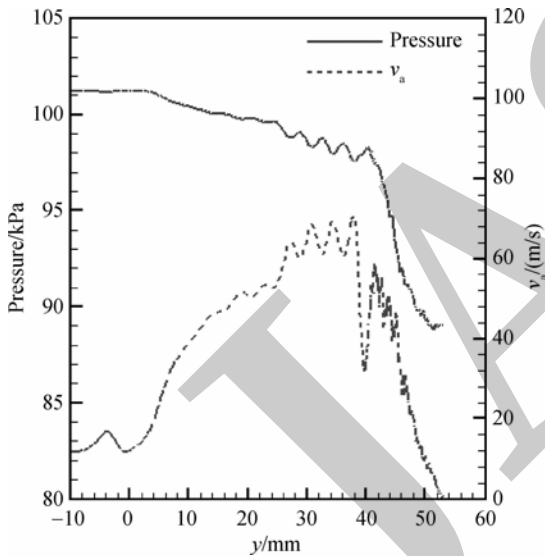


图 12 喷嘴中心轴线上压力及轴向速度
沿轴向变化图

Fig. 12 Pressure and axial velocity change along axis
direction in the central axis of the injector

由于压降是气核进入喷嘴的主要动力,图 12 给出了喷嘴中心轴上压力及轴向速度沿轴向变化图。可以看出,中心轴上的压力一直沿 y^+ 方向下降,这是由于旋转液膜带动中心的气核旋转向下运动,导致压力降低,外界气体由此继续进入喷嘴形成气核。除了内外压差带来的气动力之外,向上运动的气核还受到向下运动的液体的气液剪切作用,尤其在喷嘴的收敛段,喷嘴出现了结构上的突变,液体迅速聚集后在 $y=40\text{ mm}$ 的收敛段与等直段交界处产生了极强的气液相互作用,使得

该区域气体速度迅速下降,此后虽因压降的作用而略有增加,但仍未恢复到之前的最大速度。总的来说,气核轴向速度是喷嘴内轴向压降和气液作用力共同作用的结果。其中,轴向压降为气核向上运动提供动力,但气液相互作用会阻止气核的运动,且气液相互作用的剧烈程度与喷嘴构型有关,在喷嘴结构变化较大的收敛段,液体聚集,速度增大,气液相互作用增强。

3 结 论

本文采用 VOF 模型对离心式喷嘴的内部流动进行了数值仿真研究,着重分析了液体充填过程中气液界面的形态变化、液膜厚度和出口喷雾锥角随时间的变化关系,并通过对稳态三维流场的分析进一步加强对离心式喷嘴工作过程的认识。

1) 分析了喷嘴的充填过程气液分界面的发展,表明喷嘴的充填过程伴随着气核收缩,且该过程在周向不均匀,同时发现了流线的顺时针旋转及液膜表面的“褶皱”现象。

2) 通过提取气相体积分数等值线的方法计算了液膜厚度和喷雾锥角,发现充填过程中液膜厚度随出口流量增大而增大,出口喷雾锥角随出口流量增大而减小,认为这是充填过程中各向速度增加速度不均的结果,轴向速度的增加快于其他方向。

3) 分析了喷嘴稳态工作下的三维流场、压力场、速度场,发现了气核旋转现象,且旋转方向上与三维流线的逆时针旋转有关,此外,中心气核的轴向速度在其向上运动过程中先增后减,在等直段上缘接近收敛段处达到峰值。

参考文献:

[1] CHINN J J. An appraisal of swirl atomizer inviscid flow analysis; Part I the principle of maximum flow for a swirl atomizer and its use in the exposition and comparison of early flow analyses[J]. Atomization and Sprays, 2009, 19 (3): 263-282.

[2] HORVAY M, LEUCKEL W. Theoretical investigation of swirl nozzles for pressure-jet atomization [J]. German Chemical Engineering, 1986, 9(5): 276-283.

[3] 朱宁昌, 刘国球. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.

[4] KIM S, KHIL T, KIM D, et al. Effect of geometric parameters on the liquid film thickness and air core formation in a swirl injector[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 20(1): 015403. 1-015403. 11.

- [5] KHIL T, CHUNG Y, BAZAROV V G, et al. Dynamic characteristics of simplex swirl injector in low frequency range[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(2): 323-333.
- [6] 刘娟, 李清廉, 王振国, 等. 基于 VOF 方法模拟离心式喷嘴内部流动过程[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 1987-1995.
- LIU Juan, LI Qinglian, WANG Zhenguo, et al. Numerical simulation of flow field in pressure-swirl injector based on VOF interface tracking method[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 1987-1995. (in Chinese)
- [7] 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 Technology, 2003, 24(1): 28-32. (in Chinese)
- [8] 王成军, 陈海耿, 马金凤. 基于 VOF 方法数值模拟离心式喷嘴内两相流流动[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(7): 1005-1008.
- WANG Chengjun, CHEN Haigeng, MA Jinfeng. VOF-base numerical simulation of two-phase flow in swirl atomizer[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(7): 1005-1008. (in Chinese)
- [9] 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 Hang, YANG Maolin. Numerical study of two-phase flow in atomizer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(5): 888-890. (in Chinese)
- [10] 宋大亮, 周立新, 陈建华, 等. 离心式喷嘴全流场数值模拟[J]. 火箭推进, 2011, 37(5): 36-40.
- SONG Daliang, ZHOU Lixin, CHEN Jianhua, et al. Numerical simulation of full flowfield of centrifugal nozzle[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(5): 36-40. (in Chinese)
- [11] 王成军, 陈海耿, 张宝诚. 双路离心式喷嘴的实验与数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1797-1799.
- WANG Chengjun, CHEN Haigeng, ZHANG Baocheng. Experiment and numerical simulation of a dual-orifice pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(10): 1797-1799. (in Chinese)
- [12] 刘娟, 孙明波, 李清廉, 等. 基于 VOF 方法分析离心式喷嘴结构参数对性能影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2826-2833.
- LIU Juan, SUN Mingbo, LI Qinglian, et al. Analysis of geometric parameters influence on pressure swirl injector performance based on VOF interface method[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2826-2833. (in Chinese)
- [13] 刘娟. 旋转锥形液膜破碎过程实验与仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- LIU Juan. Experimental and numerical simulation of the breakup process of swirling conical liquid sheet[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] WANG Feng, FU Qingfei, YANG Lijun. Numerical simulation of flow in swirl injector for power-law fluid[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4): 890-899.
- [15] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [16] 于勇, 张俊明, 姜连田. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [17] 李清廉. 同轴式三组元喷嘴性能分析、工程应用和设计评定[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- LI Qinglian. Performance analysis, engineering application, design and evaluating of coaxial tripropellant injector[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- [18] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [19] 张新桥. 基于离心式喷嘴的多组分燃料喷雾燃烧过程研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- ZHANG Xinqiao. Research on spray combustion of multi-component fuel based on swirl injector[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)