

文章编号:1000-8055(2011)12-2826-08

基于 VOF 方法分析离心式喷嘴结构参数 对性能影响

刘娟, 孙明波, 李清廉, 王振国

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 基于两相界面追踪流体体积(volume of fluid, 简称 VOF)方法模拟了离心式喷嘴内部的流动过程, 在数值方法可靠性验证基础上, 得到了 15 个喷嘴构型的流量系数、液膜厚度以及雾化锥角. 定义无量纲影响因子 η , 比较喷嘴结构参数对喷嘴性能的影响程度. 除了喷嘴直径和旋流室直径外, 重点研究了出口扩张角、等直段长径比等结构参数的影响, 通过与试验相对比, 综合以往经验公式, 得到如下结论: 增大旋流室长度, 能够增大雾化锥角; 在喷嘴出口增加扩张角, 能够显著地减小液膜厚度, 减小雾化锥角; 增大切向口距喷嘴顶部距离, 能够改善喷嘴性能; 切向口个数和等直段长度对喷嘴性能影响不大. 该工作为下一步优化喷嘴构型打下了基础.

关 键 词: 流体体积; 离心式喷嘴; 流量系数; 液膜厚度; 雾化锥角

中图分类号: V235.21

文献标志码: A

Analysis of geometric parameters influence on pressure swirl injector performance based on VOF interface tracking method

LIU Juan, SUN Ming-bo, LI Qing-lian, WANG Zhen-guo

(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. Three target values including discharge coefficient, film thickness and spray cone angle were obtained after validating the reliability of numerical method. Non-dimensional influence factor η was defined to evaluate the influence of the 15 geometry parameters. The focus is on the geometry parameters which have not been researched much before, such as divergent angle, the length of swirl chamber and so on. The extension of the length of swirl chamber increases spray cone angle. Divergent angle at the injector exit decreases sheet thickness and increases cone angle remarkably. Increasing the distance between the injector and the top wall enhances injector performance. The number of tangent inlet and the length of central post don't have much to do with the injector performance. What have been done in this paper helps to optimize the injector geometry.

Key words: volume of fluid (VOF); pressure swirl injector; discharge coefficient; sheet thickness; spray cone angle

收稿日期:2011-05-04; 修订日期:2011-11-24

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,研究领域为液体燃料雾化和燃烧. E-mail:janny_liu123@163.com

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.关于离心式喷嘴的应用较多的理论是 1948 年阿伯拉莫维奇提出的,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^[1].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.

对于离心式喷嘴的流量系数、液膜厚度、雾化锥角等结果已有公式推导,Novikov^[2]基于无黏假设得到了离心式喷嘴出口液膜厚度,Taylor^[3]基于 pohlhausen 边界层动量积分方法,求解了带有黏性的收缩段周向、径向速度,并将其应用到离心式喷嘴中,得到了喷嘴出口液膜厚度.Dombrowski 等^[4]对离心式喷嘴内部流动低黏性流体的情况进行推导得到了喷嘴液膜厚度和雾化锥角,与试验吻合较好;Rizk 和 Lefebvre^[5-8]对包括离心式、直流式、气液同轴式在内的大量结构的喷嘴进行了系统研究,得到了有意义的结果,并将其汇总成文献^[9],为喷嘴研究提供了重要参考依据.国内的葛明龙^[10]、王之王^[11]也分别对离心式喷嘴内部流动进行了理论推导.尽管理论分析能够解释喷嘴内部流动的本质问题,得出的公式具有很大的参考价值,但是由于公式推导不可避免

的存在各种假设,因此存在一定的适用条件,且无法得到内部流场.

随着近代流体力学的发展,尤其是两相界面追踪方法的提出,离心式喷嘴内部流动过程得到了很好地揭示.岳明等人^[12]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^[13]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;Datta 等^[14]利用数值模拟的方法研究了几何参数对流量系数和喷雾锥角的影响,指出随着孔径的增大,流量系数减小,液膜锥角增大;Balasubramanyam 等^[15]利用数值模拟方法比较了喷嘴长度对液膜厚度的影响,对于短孔,液膜厚度呈非线性逐渐减小;对于长孔,液膜厚度随着孔长度增大而增大,但是作者并没有指出现象背后的原因.

尽管离心式喷嘴研究较多,但是大多集中在喷嘴直径、旋流室尺寸等参数上,对于喷嘴细致结构的研究还较少.因此,本文在验证数值方法、网格尺度对结果的影响基础上,比较了包括等直段直径、长度,旋流室直径、长度,切向口个数、位置,扩张段锥角等结构参数对流量系数、液膜厚度以及雾化锥角的影响,找到了影响喷嘴性能的关键因素,数值方法成本低,揭示内部流动过程,弥补试验的不足,为优化喷嘴构型提供参考.

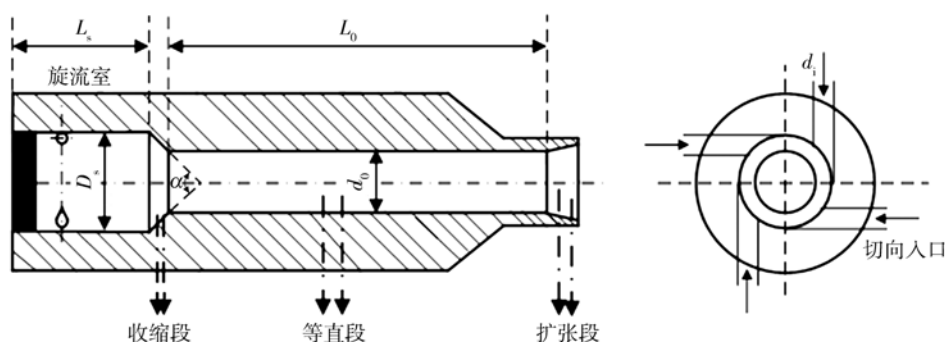


图 1 离心式喷嘴结构

Fig. 1 Sketch of pressure swirl injector structure

1 试验及数值方法

1.1 试验方法

试验是在国防科学技术大学雾化机理研究室进行,试验系统包括高压气源、配气系统、水

储罐、供应系统以及测控系统组成,压力测量采用麦克传感器公司的压阻式压力变送器,传感器最大响应频率为 30 kHz,测量精度 0.05% FS. 流量测量采用开封仪表有限公司的 LWGY 及 LWGQ 型涡轮流量计,精度等级 0.5% F.S.;数据采集采用研华 610 型工控机及 PCL1713 A/D 采集板

卡. 图像拍摄采用 Canon EOS 40D 单反相机, 曝光时间为 0.1 s, 光圈值为 2.8.

流量系数是通过测量管路流量和喷前压力, 通过流量系数公式(1)得到, 其中 A 是喷嘴出口面积, Δp 是喷嘴压降; 雾化锥角通过测量喷雾外部切向之间夹角得到, 如图 2 所示.

$$C_d = \dot{m} / A / \sqrt{2\Delta p \cdot \rho} \quad (1)$$

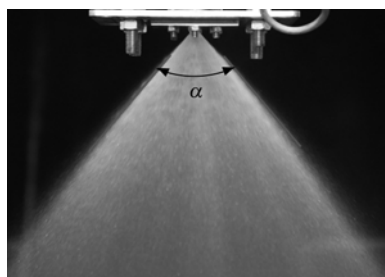


图 2 雾化锥角试验测量

Fig. 2 Experimental measurement of spray cone angle

1.2 网格及数值方法验证

本文采用两相界面追踪流体体积 (VOF) 方法计算了离心式喷嘴内部流场. 采用隐式非定常计算, 选取时间步长为 5×10^{-5} s, 每个时间步内

取 200 次内迭代. 判断收敛的条件是出口流量不再变化, 残差小于 10^{-4} . 为了验证数值方法的可信度, 进行了以下三方面的工作.

1) 比较了三种不同结构的网格的计算结果, 均匀网格能够较好地排除网格交界面的影响, 如图 3 所示.

2) 进行网格无关性验证. 比较了 40 万和 80 万网格的计算结果 (如表 1 所示), 对两个时间周期内的结果进行平均, 得到了液膜厚度、雾化锥角以及流量系数, 结果显示 40 万网格能够较好地给出出口的参数, 误差在不超过 0.1%, 为了节省计算时间, 采用 40 万网格的结果.

3) 为了比较仿真结果的可信度, 设计了不同结构的 8 个喷嘴, 得到了流量系数和雾化锥角, 比较仿真结果与试验值, 如表 2 和表 3 所示. 由表可

表 1 网格数量对结果的影响

Table 1 Comparison of grid independent

	流量系数	液膜厚度/mm	液膜锥角/(°)
40 万网格	0.20016	0.3248	56.72
80 万网格	0.20015	0.3246	56.5
误差/%	0.05	0.06	0.39

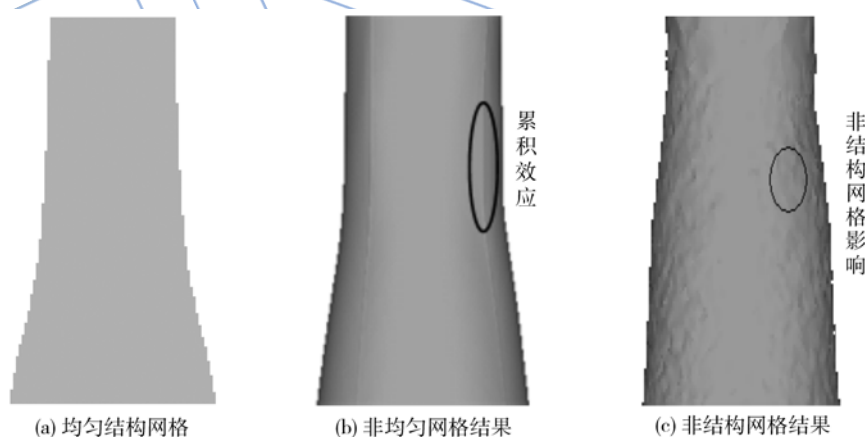


图 3 网格形状影响

Fig. 3 Influence of mesh type

表 2 流量系数 C_d 仿真与试验值比较

Table 2 Discharge coefficient comparison between numerical and experimental results

	出口直管段高度 L_0 /mm			出口扩张角 θ /(°)			喷嘴直径 d_0 /mm		
	5	25	45	0	10	20	4	5	6
仿真结果	0.20016	0.20408	0.19772	0.2005	0.20016	0.2002	0.20177	0.20016	0.1985
实验结果	0.240	0.236	0.229	0.262	0.240	0.253	0.253	0.234	0.210

表 3 雾化锥角仿真与试验值比较 (单位: (°))

Table 3 Spray cone angle comparison between numerical and experimental results (unit: (°))

	出口直管段高度 L_0 /mm			出口扩张角 $\theta/(^{\circ})$			喷嘴直径 d_0 /mm		
	5	25	45	0	10	20	4	5	6
仿真结果	56.72	52.38	49.41	75.20	56.72	47.00	52.10	56.72	64.70
实验结果	62.9	59.6	55.9	84.6	62.9	54.1	53.5	58.7	67.4

见,流量系数的仿真结果和试验结果有相同的趋势,但数值普遍偏小,其原因主要是由于湍流 $k-\epsilon$ 模型对于壁面黏性计算不准确,导致损失过大,且喷嘴加工不可避免地存在误差;雾化锥角的仿真与实验结果具有相同的变化趋势,且数值差别不大. 因此在相同的网格和边界条件下,文中所采用的方法

能够比较结构参数对结果的影响趋势及程度.

通过以上 3 个步骤,最终选取的网格及计算结果如图 4(a)所示,图 4(b)代表 $z=0$ 对称面的水体积百分含量. 图中 δ 是液膜厚度,定义水含量为 0.5 的位置作为气液界面,通过对喷嘴出口直径方向上的水分布取平均值得到; α 是雾化锥角,通过测量喷嘴外部气液分界面的切线夹角得到; 另外,流量系数 C_d 是通过对两个时间周期内的出口流量、喷注压降取平均值,根据流量系数公式 (1)得到的.

2 结果分析

仿真中以表 4 所列喷嘴构型为基准,改变包括喷嘴出口直径 d_0 、出口直管段高度 L_0 、旋流室直径 D_s 、旋流室长度 L_s 、切向口距喷嘴顶部距离 H 、切向口个数 n 、扩张角 θ 共 7 个影响因素,每个因素取三个水平,获得 15 个不同结构喷嘴. 表 2 给出了不同喷嘴性能的仿真结果.

定义无量纲影响因子

$$\eta = \frac{(\phi - \phi_{\text{ref}})/\phi_{\text{ref}}}{(\xi - \xi_{\text{ref}})/\xi_{\text{ref}}} \tag{2}$$

其中 ϕ 是目标函数,指的是流量系数、液膜厚度或者雾化锥角中的一个, ξ 是喷嘴的结构因素,下标 ref 指的是基准喷嘴的值,即表 4 所列结构喷嘴的计算结果. η 表示无量纲影响因子,其中负值代表随着结构参数的增加,目标值逐渐减小. η 表示结构参数每变化 1%,引起的目标值的相对变化量. 例如,当 ϕ 为流量系数, ξ 为等直段直径时, η 表示直径每变化 1%,流量系数的相对变化量. 但是切向口个数的无量纲影响因子为目标函数的相对变化量,即公式 (2) 中的分子部分.

表 4 基准喷嘴构型

Table 4 Geometry size of base injector

d_0 /mm	L_0 /mm	D_s /mm	L_s /mm	H /mm	n	$\theta/(^{\circ})$
5	5	9.2	9.2	5	4	10

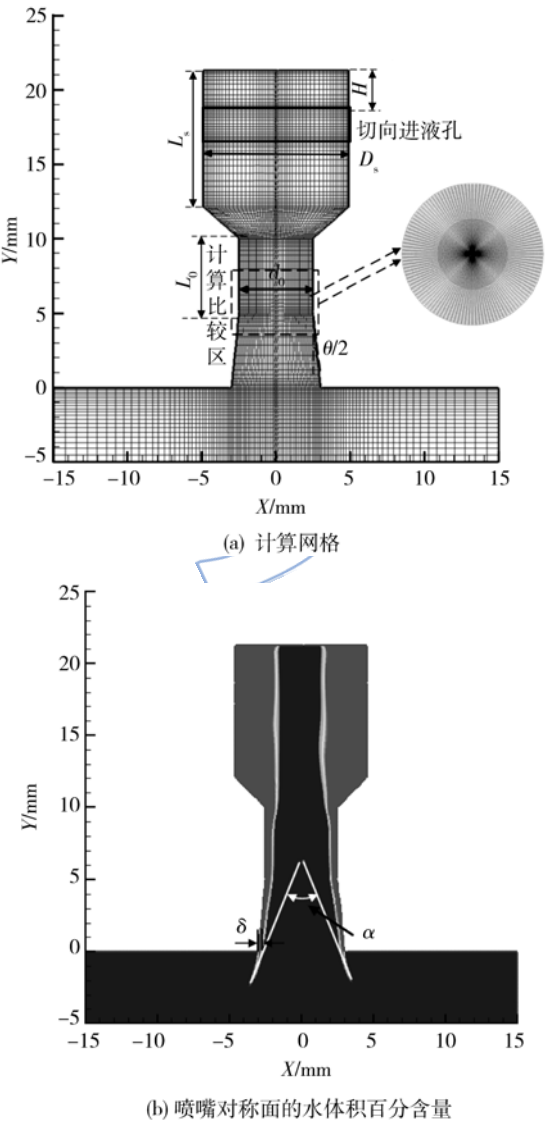


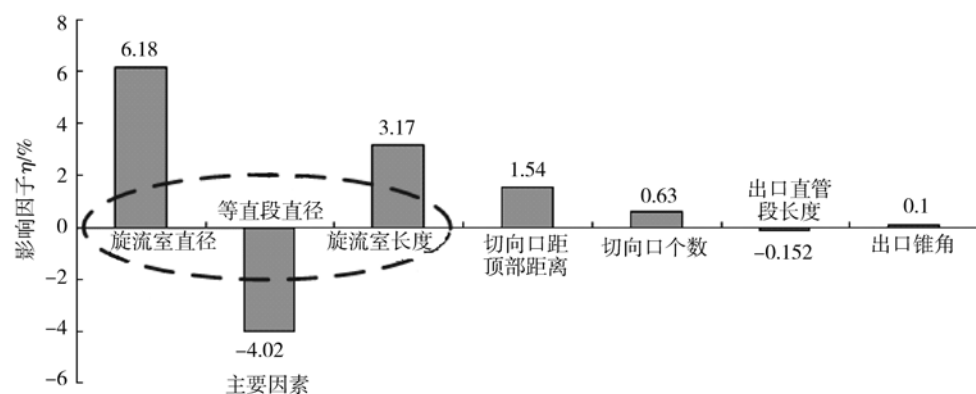
图 4 仿真网格及典型结果

Fig. 4 Mesh and typical results

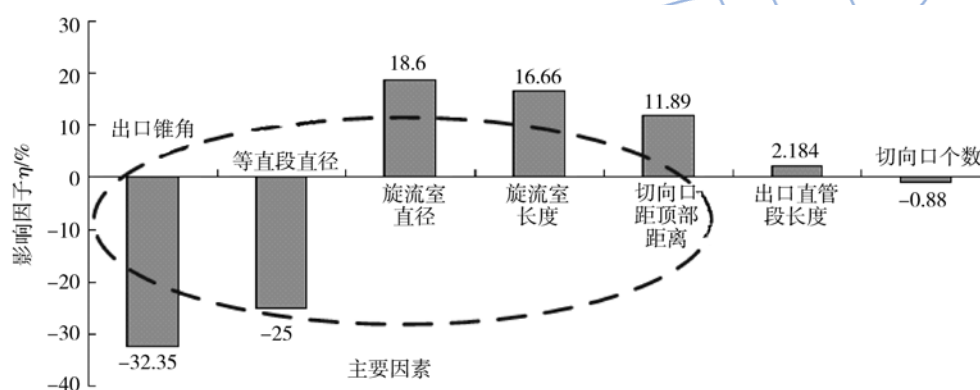
图5给出了喷嘴流量系数、液膜厚度、雾化锥角的无量纲影响因子,下面逐个分析喷嘴性能的影响因子。

流量系数反映了液体的流通能力,一般来讲,

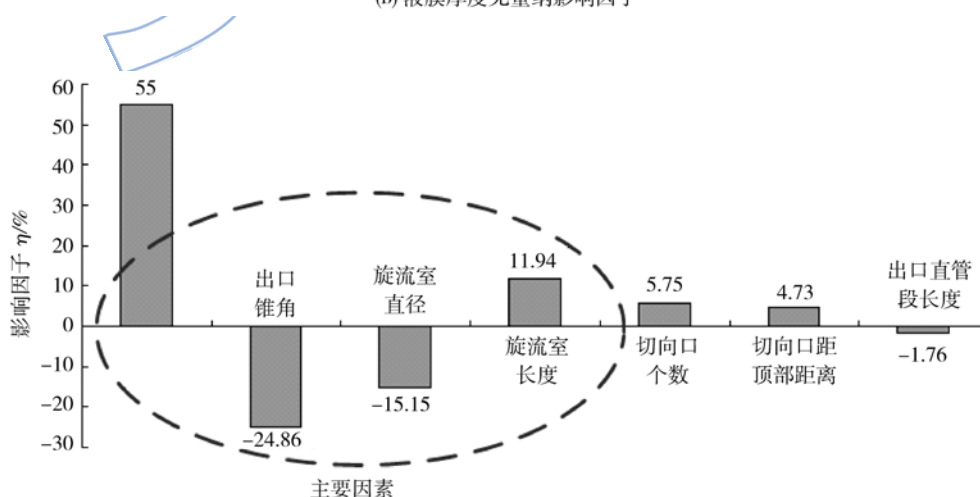
离心式喷嘴的流量系数较小,其原因可以分为两个方面,一是由于空气核的存在,液体的实际流通面积小于喷嘴直径,二是黏性引起的压力损失。Rizk 和 Lefebvre^[5]在大量实验的基础上给出了流



(a) 流量系数无量纲影响因子



(b) 液膜厚度无量纲影响因子



(c) 雾化锥角无量纲影响因子

图5 无量纲影响因子分析

Fig. 5 Analyze of non-dimensional influence factor

量系数的经验公式,该公式现在仍在广泛使用.

$$C_d = 0.35 \left(\frac{A_p}{D_s d_0} \right)^{0.5} \left(\frac{D_s}{d_0} \right)^{0.25} \quad (3)$$

由图 5(a)可见,对流量系数影响较大的结构参数分别是旋流室直径 D_s ,等直段直径 d_0 以及旋流室长度 L_s ,无量纲影响因子分别为 6.18%, -4.02% 以及 3.17%. 喷嘴出口直径的影响趋势和公式(3)及其他文献中一致,旋流室直径对流量系数的影响趋势和公式(3)相反,但是与文献[16]中结果一致. 与以往研究相比,影响流量系数的参数除了旋流室直径以及等直段直径以外,旋流室的长度以及切向口的位置也能影响流量系数,旋流室长度增加,切向口距离顶部越远,流量系数越大,图 6 给出了 $L_s = 9.2, 18.4$ mm 内部流场对比,其中 $Y = 20$ mm 截面位于旋流室, $Y = 0$ mm 截面是出口截面,由图 6 可见,增加旋流室长度,不管在旋流室内部还是喷嘴出口处截面,速度减小,相应需要提供离心运动的向心力减小,在旋流室内部,对应于入口截面的压力减小,在相同流量下,流量系数减小. 喷嘴直管段长度对流量系数影响不大,即黏性损失在喷嘴内部流动中影响不大.

液膜厚度是影响液膜破碎雾化的重要因素, Rizk 和 Diwakar 曾给出了锥形液膜破碎后的液滴半径正比于液膜厚度,即 $r \propto \sqrt{\delta}$, 减小液膜厚度是改进喷嘴构型的目标之一. Taylor^[3] 求解了带有黏性的收缩段周向、径向速度,并将其应用到离心式喷嘴中,得到了喷嘴出口液膜厚度

$$\frac{\delta}{R_2} \geq 23.8 \sqrt{\frac{\mu}{UR_2}} \quad (4)$$

其中 $U = \sqrt{2\Delta P/\rho}$ 为液体出口速度, δ 为液膜厚度, R_2 为喷嘴出口直径, μ 为液体动力黏度,计算得到的液膜厚度在 0.160 mm 左右.

由图 5(b)可见,影响液膜厚度的喷嘴结构参数较多,以无量纲影响因子 $\eta > 10\%$ 为界,超过该临界点的参数有出口锥角、等直段直径、旋流室直径、长度以及切向口距离顶部距离,其无量纲影响因子分别为 -32.35%, -25%, 18.6%, 16.66% 以及 11.89%. 出口扩张角和等直段直径对液膜厚度的影响因子均为正值,但出口锥角的影响因子大于等直段直径,即出口锥角每增加 2° 引起的液膜厚度变化量大于喷嘴直径增加 1 mm 引起的变化量. 由图 6 可知,增加旋流室的长度,喷嘴出口的速度减小,在相同流量下,液膜厚度增加.

雾化锥角反映了喷雾分布的范围,一般来说,雾化锥角越大,喷雾受到周围气体的剪切作用越

强,与环缝气体混合的越好,相应地雾化粒径就会减小.

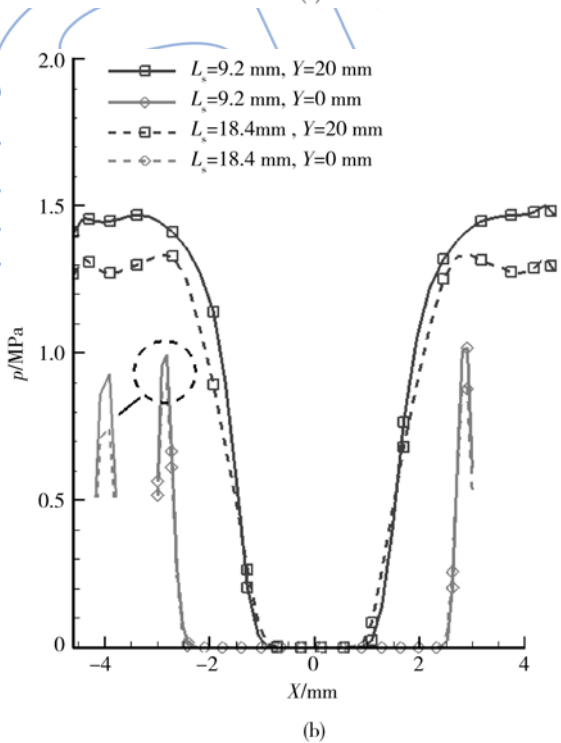
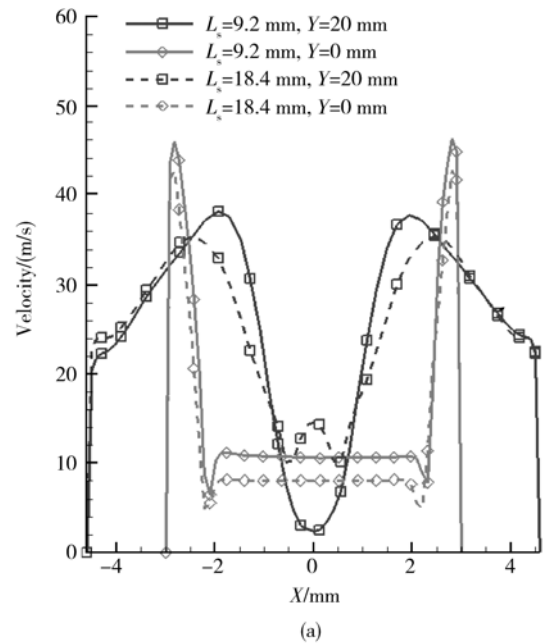


图 6 $L_s = 9.2, 18.4$ mm 内部流场对比

Fig. 6 Flow field comparison between injectors

$L_s = 9.2, 18.4$ mm

影响雾化锥角的因素很多, Rizk 和 Lefebvre 在文献[9]中指出

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{C_d}{K_v(1-X)} \propto \left(\frac{A_p}{D_s d_0} \right)^{0.21} \left(\frac{D_s}{d_0} \right)^{0.25} \quad (5)$$

由图 5(c)可知,影响雾化锥角的结构因素主要由喷嘴直径、出口锥角、旋流室直径以及旋流室长度.喷嘴直径增大,雾化锥角增大,这与公式(5)的结论是一致的,除此之外,喷嘴出口扩张角和旋流室长度也是影响雾化锥角的因素,增加出口锥角,雾化锥角越小,图 7 给出了喷嘴出口局部区域速度角,速度角是根据径向速度和轴向速度的比值计算出来的,可见,越接近喷口,速度角是逐渐减小的.旋流室长度增加,喷嘴径向速度减小,速度角减小.

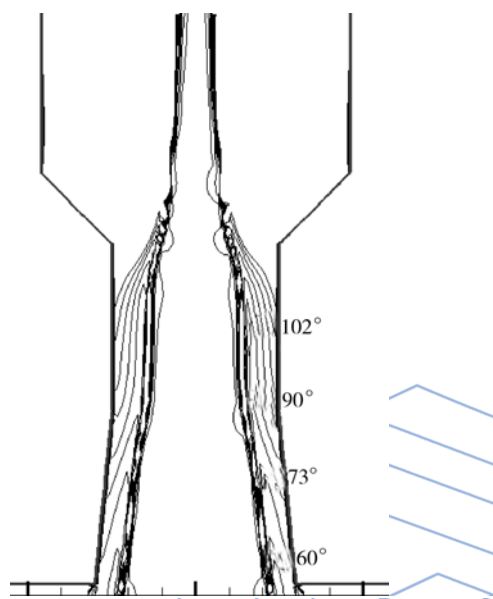


图 7 喷嘴出口处速度角变化
Fig. 7 Velocity angle change at injector exit

综合以上分析可以看出,影响喷嘴性能的结构参数除了以往研究较多的旋流室直径、直管段直径外,喷嘴出口扩张角也较大程度上影响喷嘴液膜厚度以及雾化锥角,其重要程度分别排在相应影响因素的第一、二位,喷嘴旋流室长度越长,流量系数越大,雾化锥角越大,文献[17]曾指出 L_s/D_s 在 2.75 时,雾化效果最好.本文中可以看出切向口个数对喷嘴性能影响不大,但增加切向口个数,能够改善喷嘴性能,文献[1]中认为喷嘴个数一般取 2~4 个,因此通常取 4 个较合适;出口直管段对喷嘴性能影响也不大,直管段长度的增加只能增加黏性损失,而黏性损失在喷嘴内部流动中不占主导因素.

3 结 论

本文基于两相界面追踪 VOF 方法模拟了喷嘴内部流动过程,将离心式喷嘴分为旋流室、收缩

段、等直段、扩张段几个部分,定义无量纲影响因素,分析了喷嘴各个结构参数对喷嘴性能的影响,着重分析了以往研究不多的喷嘴出口扩张角、旋流室长度、切向口个数、直管段长度等参数对喷嘴性能的影响.得到以下结论:

1) 基于 Fluent 的 VOF 方法能较好地模拟喷嘴内部流动过程,较准确地预测雾化锥角,反映流量系数变化趋势,减少了试验次数和试验成本,为喷嘴改型提供参考;

2) 喷嘴出口扩张角能较大程度地减小液膜厚度,增大雾化锥角,对液膜厚度的影响程度大于直径的影响程度,对雾化锥角的影响程度仅次于喷嘴直径;

3) 喷嘴旋流室长度增大,流量系数和雾化锥角增加,同时液膜厚度也增大.

4) 切向口个数越多,流量系数越大,雾化锥角越大,液膜越薄,越有利于雾化,因此一般选取 4 个切向口;

5) 等直段长度对喷嘴性能的影响不大,黏性引起的损失在喷嘴内部流动中不占主导因素,因此基于无黏假设得到的离心式喷嘴内部流动过程的公式是可信的.

6) 喷嘴旋流室直径、直管段直径仍是影响喷嘴性能的关键因素.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Novikov I I. Atomization of liquids by centrifugal nozzles [J]. Journal of Technical Physics, 1948, 18(3): 345-354.
- [3] Taylor G I. The boundary layer in the converging nozzle of a swirl atomizer [J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1949, 3(2): 129-139.
- [4] Dombrowski N, Hasson D. The flow characteristics of swirl spray pressure nozzles with low viscosity liquids [J]. Journal of AIChE, 1969, 15(4): 604-611.
- [5] Rizk N K, Lefebvre A H. Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers [J]. Journal of Propulsion and Power, 1985, 1(3): 193-199.
- [6] Rizk N K, Lefebvre A H. Spray characteristics of simplex swirl atomizers [R]. Easton City, PA, United States: Purdue University Lafayette College Combustion Laboratory, CSS/CI-83-19, 1983.
- [7] Rizk N K, Lefebvre A H. Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Volume 1, ICLASS-85, London, England: ICLASS, 1986: III C/2/1-III C/2/16.

- [8] Rizk N K, Lefebvre A H. Influence of airblast atomizer design features on mean drop size[J]. AIAA Journal, 1983, 21(8):1132-1142.
- [9] Lefebvre A H. Atomization and sprays[M]. New York: Hemisphere pub. corp. , 1989.
- [10] 葛明龙. 离心式喷嘴理论的改进[J]. 宇航学报, 1981, 2(4):85-97.
GE Minglong. An improvement on the theory of swirl injector[J]. Journal of Astronautics, 1981, 2(4): 85-97. (in Chinese)
- [11] 王之任. 离心式喷嘴工况理论分析[J]. 推进技术, 1996, 17(5):1-8.
WANG Zhiren. Theoretical analysis for operating condition of centrifugal injector[J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 17(5):1-8. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] Ashraf 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(10): 945-953.
- [14] Datta A, So S K. Numerical prediction of air core diameter, coefficient of discharge and spray cone angle of a swirl spray pressure nozzle[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21(4):412-419.
- [15] Balasubramanyam M S, Chen C P. Numerical design studies on internal flow characteristics of LOX/CH₄ swirl injector[R]. AIAA 2009-5040, 2009.
- [16] Carlisle D R. Communication on the performance of a type of swirl atomizer[J]. Proc. Inst. Mech. of Eng. , 1995, 209:169.
- [17] Elkotb M M, Rafat N M, Hanna M A. The influence of swirl atomizer geometry on the atomization performance [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Tokyo Japan: ICLASS, 1978:109-115.