

敞口式离心喷嘴内部及近喷口区域的 流动特性

陈 晨^{1,2}, 杨 样², 高宏力¹, 晏至辉², 杨顺华²

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031;

2. 中国空气动力研究与发展中心 吸气式高超声速技术研究中心, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为了深入理解敞口式离心喷嘴雾化机制, 基于界面追踪法 VOF(volume of fluid)和 RNG(renormalization group)湍流模型对敞口式离心喷嘴进行数值模拟, 计算结果与 PDPA(phase Doppler particle analyzer)及单反相机测得的喷嘴出口速度和雾化锥角一致性较高。清晰地捕获了中心空气涡结构及喷嘴内部的回流区, 展现了切向孔与旋流室的交互影响, 并着重分析了液膜厚度演变特性及喷嘴内外速度场发展规律。随着喷注压降的增加, 破碎长度降低, 打开长度及喷雾角增加。揭示了敞口式离心喷嘴独特的流动机制, 为喷嘴雾化性能预测及结构优化提供依据。

关 键 词: VOF 模型; 内部流动; 空气涡; 敞口式离心喷嘴; 雾化

中图分类号: V233.22

文献标志码: A

Flow field in and near the open-end swirl injector

CHEN Chen^{1,2}, YANG Yang², GAO Hong-li¹,

YAN Zhi-hui², YANG Shun-hua²

(1. School of Mechanical Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Air-breathing Hypersonic Technology Research Center,

China Aerodynamics Research and Development Center,

Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: A numerical simulation using the VOF (volume of fluid) interface tracking method and RNG (renormalization group) turbulence model was carried out in order to deeply understand the atomization mechanism of the open-end swirl injector. The feasibility of the numerical calculation was verified by using PDPA (phase Doppler particle analyzer) and camera to measure the injector exit velocity and the spray angle. The central air core and the recirculation regions in the injector were captured. And the interaction between the tangential inlets and swirling chamber was revealed. What's more, the evolving characteristic of the liquid film thickness and the development law of the internal and external velocity field were emphatically analyzed. With the increasing of the pressure drop, the breaking length decreases while the opening length and the spray angel increase. The unique mechanism of the open-end swirl injector is revealed so it can be helpful to predict of the atomization performance and the structure optimization.

Key words: VOF model; internal flow; air core; open-end swirl injector; spray

离心式喷嘴具有结构简单、雾化能耗小且性能优异的特点,自 1902 年提出以来,在液体火箭发动机、燃气轮机及内燃机等热力设备上得到广泛应用.通常离心式喷嘴的设计及计算基于最大流量原理法或动量方程法进行^[1],但以上方法主要适用于工程计算,难以清晰展现离心式喷嘴喷雾物理图像和内部流动机理.离心式喷嘴近喷口区域的液膜厚度、喷雾锥角及速度场等特性参数在很大程度上决定了液膜一次破碎、液带二次破碎及最终液滴群粒径、速度等分布特性,而近喷口区域流动由喷嘴切向孔及旋流室内的气液流动、液膜形成及演化过程直接决定.因此,为了帮助预测、优化和控制离心式喷嘴喷雾特性,有必要对离心式喷嘴切向孔、旋流室及近喷口区域的流动进行整体研究.

Holtzclaw 等^[2]、Jeng 等^[3]及张永良^[4]、刘娟^[5]先后采用透明玻璃对离心式喷嘴内部填充过程进行可视化试验,捕获了空气涡及回流现象,但内部空气涡直径、流体速度、压力等参数的试验测量难度大,并且精度也难以保证.近年来,随着数值计算和计算机技术的发展,人们开始采用数值模拟对离心喷嘴内流特性进行研究,此时气液分界面的捕捉精度对计算结果影响很大.目前发展较为成熟的 VOF(volume of fluid)模型能够表征复杂的界面结构,相界面捕捉锐利程度高,适合工程应用而广受重视.国外学者 Madsen 等^[6]和 Hansen 等^[7-8],以及国内岳明等^[9]、刘娟等^[10-11]、周立新等^[12]和宋大亮等^[13]均采用 VOF 模型开展离心式喷嘴的计算模拟研究.具体处理时,Madsen, Hansen 等^[6-8]没有考虑切向孔内流动,岳明、刘娟等^[9-11]将切向孔简化为等面积方槽,周立新、宋大亮等^[12-13]则将离心式喷嘴流动整体简化为轴对称计算,切向孔采用切向环带替代.对切向孔流动的省略和简化,势必造成难以模拟切向孔和旋流室的交互影响,影响计算精度和部分流动机理的揭示,如 Madsen 等^[6]与试验对比后指出计算域包含切向孔计算结果才能更精确.

离心式喷嘴按结构可分为缩口式和敞口式.相对于缩口式离心喷嘴,敞口式离心喷嘴具备良好的动态特性且结构更简单,但内部流动特性研究还不充分,特别是包含切向孔、旋流室及近喷口全流域的计算模拟和流动演化特性的研究鲜见开展.本文针对敞口式离心喷嘴,采用 VOF 模型开展全尺度网格模拟,计算域从切向孔入口开始直至喷嘴出口的自由外流区,旨在展现切向孔与旋

流室的交互影响,揭示中心空气涡的生成过程、喷嘴内外速度、压力及液膜厚度的发展规律,进而理解敞口式离心喷嘴内部及近喷口流动和演化特性,为有效预测和控制敞口式离心喷嘴的外部雾化特性提供依据.

1 试验及数值计算方法

1.1 试验系统

试验装置如图 1 所示,分别采用美国 TSI 公司的 PDPA 和单反相机进行速度测量和图像拍摄,同时还测量压力和流量等物理参数. PDPA 利用多普勒效应进行速度测量,即接收探头接收到的散射光与发射探头的入射光之间存在多普勒频移,通过频移值与粒子速度间的线性关系获得测量点的粒子速度,精度偏差不大于 0.1%. 喷雾锥角通过处理单反相机图像获得,试验所用敞口式离心喷嘴如图 2 所示.

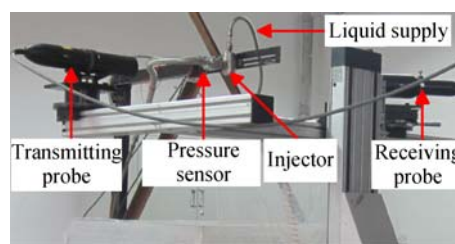


图 1 敞口式离心喷嘴测量系统

Fig. 1 Measurement system of the open-end swirl injector

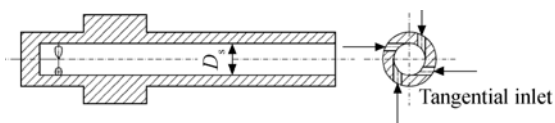


图 2 敞口式离心喷嘴结构示意图

Fig. 2 Sketch of the open-end swirl injector

1.2 计算方法、网格及边界条件

VOF 方法是使用体积分数 φ 来表征第二相流体在计算网格中的体积含量(取密度较小空气为第一相,水为第二相).当 $\varphi=0$ 时,网格内全部为气体,当 $\varphi=1$ 时,网格内全部为液体,当 $0 < \varphi < 1$ 时,网格内为气液混合物.

给定流场和初始体积分数的分布,则体积分数的输运方程为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \varphi = 0 \quad (1)$$

式中 t 为时间, $\mathbf{v}$ 为速度矢量.

在气液混合区内,流体密度 ρ 和动力黏度 μ 可以表达为

$$\rho = (1 - \varphi)\rho_g + \varphi\rho_l \quad (2)$$

$$\mu = (1 - \varphi)\mu_g + \varphi\mu_l \quad (3)$$

式中下标 l 为液体, g 为气体。

求解式(1)~式(3)需结合质量及动量守恒方程进行. 压力-速度耦合采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)方法,压力的离散方法采用适合多孔旋流的 PRESTO(pressure staggering option)方法,表面捕捉采用 CICSAM(compressive interface capturing scheme for arbitrary meshes)技术,湍流模型采用 RNG(renormalization group) $k-\epsilon$ 模型。

图 3 为离心喷嘴网格模型,切向孔与喷嘴身部交界处呈雨滴形,难以采用结构网格处理,因此切向孔及旋流室顶端采用四面体网格,其余部分采用六面体网格. 研究表明^[14],网格精度对喷雾角和破碎长度有显著影响,网格处理不当会导致无法准确捕捉空心圆锥内的涡及大液滴. 为了兼顾计算精度并控制计算资源,外流场直径 D_t 和长度 L 分别取为 6 倍和 4 倍旋流室直径 D_s . 喷嘴近喷口区域划分为中心区、内轮廓区和外轮廓区 3 部分,内轮廓区和外轮廓区在靠近喷雾角区域处网格加密. 网格总数约 470 万,沿喷嘴轴线流动方向取为 X 轴, Y-Z 平面与 X 轴垂直面。

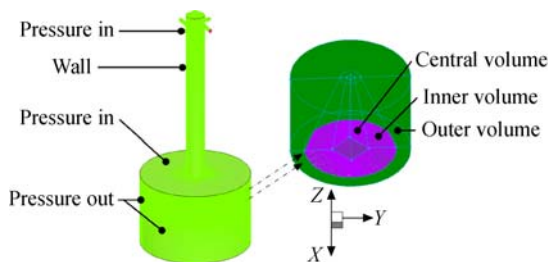


图 3 离心喷嘴网格及边界条件

Fig. 3 Mesh and boundary of swirl injector

如图 3 所示,液体和气体入口采用压力入口,将液体进口第二相体积分数设为 1(入口只有水进入),气体入口处第二相的体积分数设为 0(只有空气),出口采用压力出口. 第二相的回流体积分数设为 0,从而保证水从出口流出后不会返回计算域参与计算,采用无滑移壁面。

2 结果及分析

2.1 数值方法验证

喷雾角模拟、测量和经验公式解对比如表 1

所示。

Lefebvre 等^[15-16]理论公式一方面假设流体没有黏性,忽略液体与喷嘴内壁之间的摩擦力作用,会导致喷雾角的理论公式解较试验测量值偏大,试验照片如图 4 所示;另一方面还假设径向速度为零,实际上是将径向速度转移到了切向速度,进一步增加了 Lefebvre 理论公式解与试验值的偏差. 数值模拟由于引入了人工黏性,使得计算结果较试验值偏小,两个工况喷雾角偏差均不大于 5%。

现有的液膜厚度半理论半经验公式大多来自

表 1 液膜厚度及喷雾角对比

Table 1 Comparisons of liquid film thickness and spray angle

压降/ MPa	数据 来源	喷雾角/ (°)	液膜 厚度/mm
0.2	本文试验	77.5	
	本文 CFD	75.99	0.55
	文献[16]	110.3	0.66
	文献[17]		0.56
	文献[18]		0.49
0.55	本文试验	82.4	
	本文 CFD	78.93	0.52
	文献[16]	117.4	0.58
	文献[17]		0.50
	文献[18]		0.43
0.80	本文试验	83.8	
	本文 CFD	80.09	0.5
	文献[16]	119.2	0.56
	文献[17]		0.47
	文献[18]		0.41



图 4 敞口式离心喷嘴试验照片

Fig. 4 Photograph of the open-end swirl injector

缩口式离心喷嘴模型,为了修正敞口式离心喷嘴旋流室结构等不同带来的偏差,FU Qingfei 等^[17]结合试验结果对 Lefebvre 等^[18]和 Rizk 等^[16]的经验公式系数进行修正得出敞口式离心喷嘴液膜厚度公式(式(4)),表 1 计算结果表明该经验公式结果与 CFD 计算结果误差不超过 6%,可见该修正公式更适用于敞口式离心喷嘴.液膜厚度(h)虽然存在一定偏差,但不影响对液膜变化趋势的定性分析,下一步可开展试验做进一步验证.

$$h = 3.66(2r_p \dot{m} \mu / \rho \Delta p)^{0.25} \quad [16] \quad (4)$$

$$h = 3.1(2r_p \dot{m} \mu / \rho \Delta p)^{0.25} \quad [18] \quad (5)$$

$$h = 2.7(2r_p \dot{m} \mu / \rho \Delta p)^{0.25} \quad [19] \quad (6)$$

图 5 为 $X=65\text{ mm}$ 处试验与数值模拟速度值对比,横坐标 R_t 与 r 分别为喷嘴出口直径和出口处径向位置.图中轴向速度值与切向速度计算值均与试验结果较为吻合, $X=65\text{ mm}$ 处液滴较密,光散射较大,因此偏差可能与光学测量精度及后处理方法等有关.

从以上喷雾角、液膜厚度、速度计算值与试验值及经验公式的对比可见,采用的数值计算方法和计算网格合理可行,计算结果是可信的.

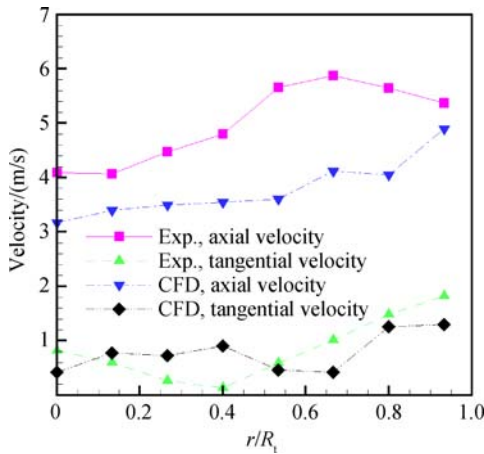


图 5 喷嘴出口速度对比

Fig. 5 Comparison of injector exit velocity

2.2 旋流室流动特性

图 6 为喷注压降为 0.55 MPa 时喷嘴轴向速度及静压分布(下文皆为喷注压降 0.55 MPa 流场).液体在压力驱动下,经切向孔进入喷嘴形成旋流并以锥形液膜流出喷嘴.在径向上,液体旋流产生的离心力与液体微团上的静压力差相等,因此在喷嘴内部压力沿径向自壁面往轴线依次递减.根据角动量守恒,越往喷嘴中心旋流速度越大,结合伯努利方程速度压力耦合关系可知,至轴

线处压力最低,如图 6 中旋流室轴线上静压低于环境压力,从而使喷嘴外部空气卷吸进入喷嘴,最终在喷嘴中心形成空气涡.

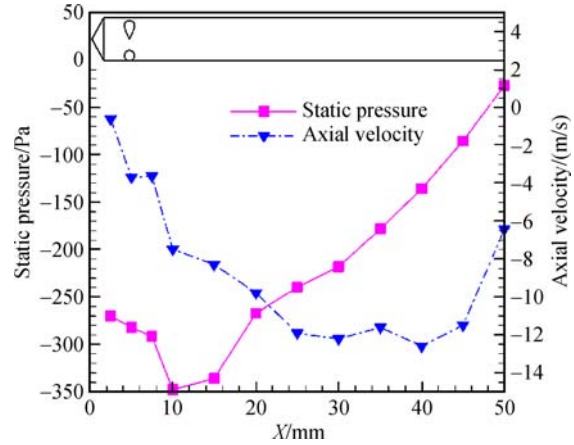


图 6 X 轴上静压及轴向速度

Fig. 6 Static pressure and axial velocity along X axis

喷嘴内部及近喷口区域流动特性如图 7(a)所示,图 7(b)为喷嘴内不同截面的气液分布图,液膜厚度在喷嘴内呈非线性发展规律,自喷嘴顶部至切向孔下游液膜厚度大幅度衰减,而切向孔下游至喷嘴出口液膜厚度缓慢增加,在喷嘴出口处如图 7(a)中 a 区域所示液膜厚度再次大幅度降低.在喷嘴出口截面,压力等于外界大气压力,部分压力势能转化为轴向动能,使得轴向速度增加,如图 6 中轴线上喷嘴出口附近速度值急剧上

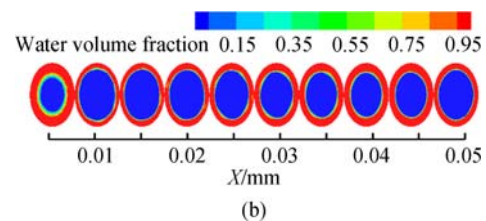
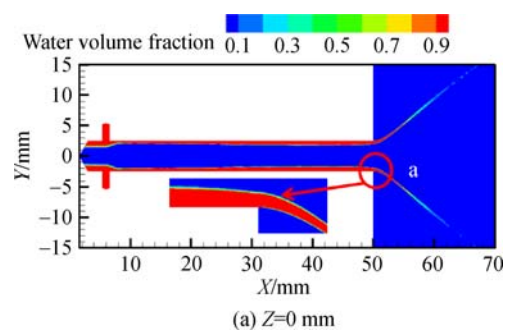


图 7 敞口式离心喷嘴水体积分数

Fig. 7 Water fraction contours of the open-end swirl injector

升,为了保持质量流量守恒,液膜厚度在靠近喷嘴出口处逐渐变薄.液膜流出喷嘴后,与附近空气速度的差异引起气动力作用其上,当表面张力不足以维持液膜结构时,液膜逐渐变薄失稳破裂为液带或液丝,若喷嘴出口处轴向速度较大会产生较大的气动力,而气动力大有利于雾化,同时该处液膜较薄更容易发生断裂破碎现象,同样有利于雾化,因此喷嘴出口液膜的变薄现象对雾化是有利的.图8表明,喷注压降(Δp)越大,喷嘴内旋流强度越高,空心涡直径越大,液膜厚度越小,图中液膜厚度为左右两侧模拟值取平均所得.

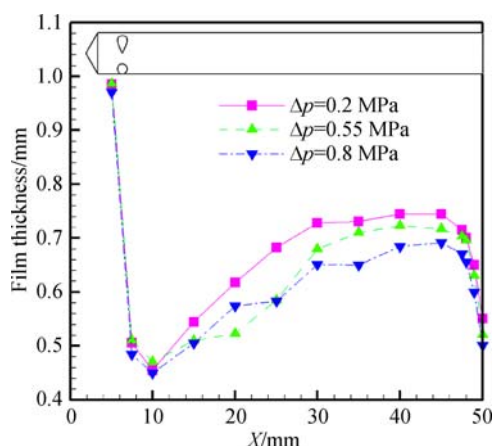


图8 不同压降下液膜厚度的轴向分布

Fig. 8 Liquid film thickness along the axis under different pressure drops

图9为喷嘴内 $X=40$ mm 截面三维速度分布,轴向速度曲线呈现出马鞍型,曲线对称性良好,喷嘴中心处轴向速度值最大,气液交界面处轴向速度出现峰值.切向速度曲线呈现出类正弦曲线形状,气液交界面处切向速度最大,由曲线中心至气液交界面处速度值越来越大,轴向速度与切向速度在近壁处由于固壁效应速度值都降低.径向速度值与轴向及切向速度值相比很小,且数值较为恒定基本在 0 m/s 上下波动,这也说明 Lefebvre 假设径向速度值为 0 m/s 具有一定依据.随着入口压力的增加,轴向、径向及切向速度值近似呈单调递增趋势.

2.3 切向孔流动特性

图10为喷嘴头部流线图,在切向孔上下游存在涡流,且轴向两侧、切向孔上下游涡流方向相反.液体自切向孔进入喷嘴,往喷嘴顶部方向的液体撞击壁面回流形成切向孔上游涡流.靠近喷嘴壁面处存在体积分数介于 0 (空气) 和 1 (水) 之间

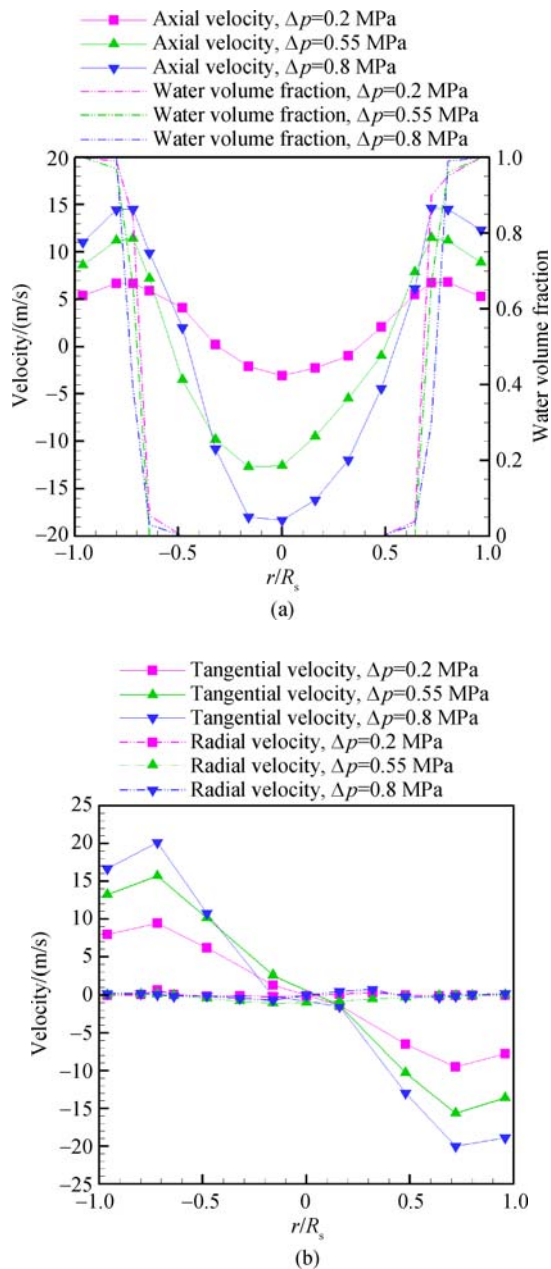


图9 旋流室速度分布

Fig. 9 Velocity distribution in swirling chamber ($X=40$ mm)

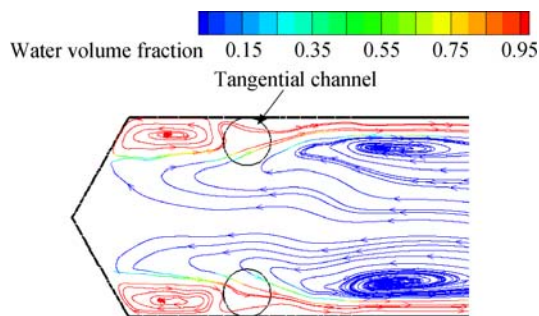


图10 喷嘴头部流线图 ($Z=0$ mm)

Fig. 10 Streamlines at the injector top ($Z=0$ mm)

的气液两相流向喷嘴外流去(下同),说明空气卷吸进入喷嘴后,部分靠近液膜的空气随液体流出喷嘴从而形成了切向孔下游的涡流。

图 11 为切向孔截面的速度及压力分布,其良好的周向对称性表明文中用 $Z=0$ mm 截面描述离心喷嘴流动特性是可行的。切向孔与旋流室交界处存在着静压与动能的转换,导致图 11(a)中 A 处静压(p_s)降低,图 11(b)中 B 处切向速度值及图 11(c)中 C 处轴向速度值增加,交界处压力速度分布并不完全均匀,因此将交互区赋予等效均匀流场无法准确反映离心喷嘴真实流动形态。液体经切向孔流入旋流室时,在入口处切向速度值最高,到下一切向孔前切向速度逐渐降低,至交界处切向速度值最低,自喷嘴中心往壁面方向速度值逐渐增加。轴向速度最大值出现在气液分界面附近,两个切向孔中间存在一个轴向速度峰值如图 11(c)中 D 处,喷嘴中心处由于空气涡的存在使得流场形状不规则。

2.4 近喷口区域流动特性

液体离开喷嘴后,由于失去了决定于喷嘴壁面反作用力的向心力,以一定角度向下游飞散形成喷雾锥。但观察图 12 发现,液膜离开喷口后并

没有立刻打开,而是存在一个打开过程,刚离开喷嘴出口时,在惯性力作用下以一较小角度前行,经过一段距离 L_a 后喷雾角 β 才完全打开,该距离定义为打开长度,之后喷雾角 β 几乎不变,至距离喷嘴出口 L_b 时液膜开始破裂成液带。随着喷注压降 Δp 的增加,破碎长度 L_b 降低,打开长度 L_a 及喷雾角 β 增加。喷注压降越高,喷嘴出口气液相对速度越大,气动力增加使得液膜更容易破碎。

图 12 中液膜出口中下游区域存在光晕,部分气相与液相交溶^[19],说明 VOF 模型对网格精度要求较高,需要更精细网格才能准确捕捉喷雾场下游气液界面,气液等势面如图 13 所示,Shinjo 等^[20]证明如果网格质量足够好,可以对液滴破碎过程进行数值模拟。

图 14 为喷嘴出口 $Z=0$ mm 平面速度等值线,由图 14 可知离开喷嘴一小段距离后,径向速度由喷嘴出口的约 0 m/s 逐渐升至 10 m/s 左右,而液膜的切向速度逐渐减小,因此液膜离开喷嘴一段距离后切向速度才开始转化为径向速度,这也解释了为何液膜离开喷嘴一定距离后才完全打开,而液膜内层轴向速度在向下游运动过程中几乎不变。

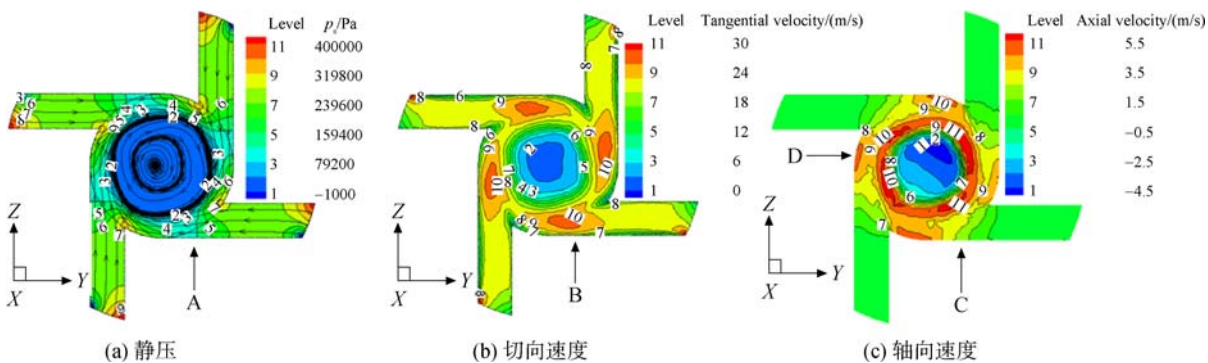


图 11 切向孔截面速度分布 ($X=6$ mm)

Fig. 11 Velocity distribution at tangential channel ($X=6$ mm)

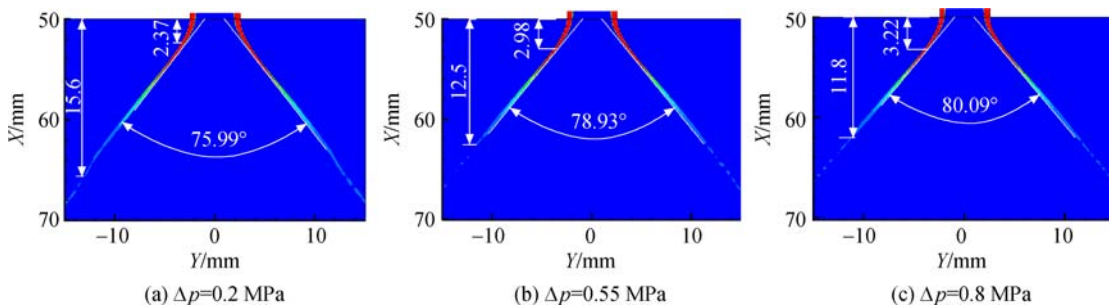


图 12 敞口式离心喷嘴液体体积分数分布图

Fig. 12 Liquid volume fraction contours of the open-end swirl injector

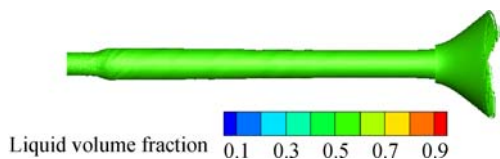


图13 喷嘴气液等势面图($\varphi=0.5$)

Fig. 13 Three-dimensional free-surface visualization with iso-value ($\varphi=0.5$)

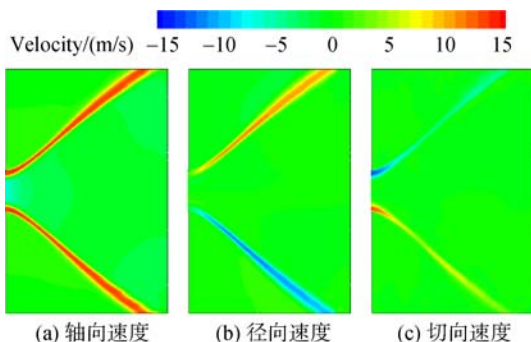


图14 喷嘴出口速度分布($Z=0\text{ mm}$)

Fig. 14 Velocity contours outside the injector ($Z=0\text{ mm}$)

3 结 论

本文对实际工程应用敞口式离心喷嘴进行数值模拟,得到了以下结论:

1) 数值模拟的喷雾锥角、液膜厚度及出口速度同经验公式以及试验的结果具有良好的一致性,喷雾角模拟值与试验值误差不超过5%,液膜厚度随喷射压降增加而变薄,模拟值与经验公式偏差不超过6%。表明采用VOF界面追踪方式、CICSAM表面捕捉技术和RNG湍流模型,模拟敞口式离心喷嘴内部及近喷口流动特性是可行的。

2) 切向孔与旋流室交界处存在着静压与动能的转换,交界处压力速度分布并不完全均匀。入口切向速度值最高,与下一切向孔交界处切向速度值最低,两个切向孔中间轴向速度存在一个峰值。

3) 喷雾角存在一个打开过程,切向速度也是离开喷嘴一段距离后才开始转化为径向速度。随着喷注压降 Δp 的增加,破碎长度 L_b 降低,打开长度 L_a 及喷雾角 β 增加。

参考文献:

[1] 阿勃拉莫维奇. 实用气体动力学[M]. 梁秀彦,译. 北京:高等教育出版社,1995.

[2] Holtzclaw D, Sakman T, Benjamin M A, et al. Investigation of flow in a simplex fuel nozzle[J]. AIAA 97-2970, 1997.

[3] Jeng S M, Jog M, Benjamin M. Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simplex fuel nozzle[J]. AIAA Journal, 1998, 36(2): 201-207.

[4] 张永良. 离心喷嘴雾化特性实验研究和数值模拟[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.

ZHANG Yongliang. Experiment and numerical studies on the atomization of a pressure atomizer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2013. (in Chinese)

[5] 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 conic liquid sheet[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)

[6] Madsen J, Hjertager B H, Solberg T. Numerical simulation of internal flow in a large-scale pressure-swirl atomizer[R]. Nottingham, UK: Institute for Liquid Atomization and Spray Systems-Europe Conference, 2004.

[7] Hansen K G, Madsen J, Trinh C M, et al. A computational and experimental study of the internal flow in a scaled pressure-swirl atomizer[R]. Zaragoza, Spain: Institute for Liquid Atomization and Spray Systems-Europe Conference, 2002.

[8] Hansen K G. A computational and experimental study of the internal flow in a scaled pressure-swirl atomizer[D]. Esbjerg, Denmark: Aalborg University, 2001.

[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 Xing, YANG Maolin. Numerical study of two-phase flow in atomizer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(5): 888-890. (in Chinese)

[10] 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): 1986-1994.

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): 1986-1994. (in Chinese)

[11] 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 tracking method[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2826-2833. (in Chinese)

[12] 周立新, 张会强, 雷凡培, 等. 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.

ZHOU Lixin, ZHANG Huiqiang, LEI Fanpei, et al. Numerical simulation of internal flow field of swirl nozzle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(6): 480-484.

- (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] Daniel F, Anne B, Thomas B, et al. Simulation of primary atomization with an octree adaptive mesh refinement and VOF method [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(6): 550-565.
- [15] Lefebvre A H. Atomization and sprays[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [16] Rizk N K, Lefebvre A H. Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers [J]. Journal of Propulsion and Power, 1985, 1(3): 193-199.
- [17] FU Qingfei, YANG Lijun, QU Yuanyuan. Measurement of annular liquid film thickness in an open-end swirl injector [J]. Aerospace Science and Technology, 2011, 15(2): 117-124.
- [18] Lefebvre A H, Suyari M. Film thickness measurements in a simplex swirl atomizer [J]. Journal of Propulsion and Power, 1986, 2(6): 528-533.
- [19] 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 Technology, 2003, 24(1): 28-32. (in Chinese)
- [20] Shinjo J, Umemura A. Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(7): 513-532.

(编辑:陈 越)