

离心喷嘴内部流动与雾化特性数值模拟

何振鹏^{1,2}, 袁茂强¹, 黎子维¹, 蔡猛³, 任金茹⁴, 甄旭东⁵

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300; 2. 重庆航天职业技术学院, 重庆 400021; 3. 中国民航大学 工程技术训练中心, 天津 300300; 4. 成立航空股份有限公司 天津研究院, 天津 300304; 5. 天津职业技术师范大学 汽车与交通学院, 天津 300222)

摘要: 为探究不同供油压力对离心喷嘴燃油雾化场的影响, 结合燃油喷嘴雾化试验研究结果与燃油雾化气液两相流数值模拟分析, 研究了不同工况下离心喷嘴的雾化特性。结果表明: 随着燃油压力的提高, 液体的动量比增大, 雾化锥角在低供油压力时受供油压力影响, 后受喷嘴结构影响, 整体趋势为先增大后减小。液体在填充过程中, 在喷嘴中心气相与液相交界面形成 1 个中心负压区, 大量空气挤入该区, 致使在喷嘴内部形成 1 个尾部呈锥形的空气涡。在旋流室上腔与雾化锥角下游区内侧, 由于空气与液体剪切力的作用, 出现多个小型涡结构, 这些涡的结构与供油压力大小有关。当供油压力为 0.4 MPa 时, 韦伯数较低, 在液膜表面产生一种沿液膜表面以正弦方式变化的表面波; 当供油压力为 2.7 MPa 时, 韦伯数较高, 液体柱状破碎由瑞利-泰勒(R-T)不稳定性主导。

关键词: 离心喷嘴; 燃油雾化; 空气涡; 柱状破碎; 瑞利-泰勒不稳定性; 航空发动机

中图分类号: V231.2+3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.01.008

Numerical Simulation of Internal Flow and Atomization Characteristics of Centrifugal Nozzle

HE Zhen-peng^{1,2}, YUAN Mao-qiang¹, LI Zi-wei¹, CAI Meng³, REN Jin-ru⁴, ZHEN Xu-dong⁵

(1. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Chongqing Aerospace Polytechnic, Chongqing 400021, China;

3. Engineering Technology Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

4. Tianjin Institute, ChengLi Aviation Co., Ltd., Tianjin 300304, China;

5. College of Automotive and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different fuel supply pressures on the fuel atomization field of centrifugal nozzles, the atomization characteristics of a centrifugal nozzle under different working conditions were studied by combining the results of fuel nozzle atomization experiments and numerical simulations of fuel atomization gas-liquid two-phase flow. The results show that the liquid momentum ratio increases with the increase in fuel pressure. The spray cone angle is influenced by the supply pressure at low supply pressure, and then by the nozzle structure, with the overall trend of first increasing and then decreasing. During the liquid filling process, a central negative pressure zone is formed at the interface of the gas phase and liquid phase in the nozzle center, a large amount of air is squeezed into the zone, resulting in the formation of an air vortex with conical tail inside the nozzle. In the upper chamber of the swirl chamber and the inner side of the downstream region of the spray cone, multiple small vortex structures appear due to the shear force of air and liquid, these vortex structures are related to fuel supply pressure. When the supply pressure is 0.4 MPa, the Weber number is low, and on the liquid film surface, a surface wave is generated that varies sinusoidally along the liquid film surface. When the supply pressure is 2.7 MPa, the Weber number is high and the liquid columnar fragmentation is dominated by Rayleigh-Taylor (R-T) instability.

Key words: centrifugal nozzle; fuel atomization; air vortex; columnar fragmentation; R-T instability; aeroengine

0 引言

为满足新一代飞机发动机对低污染物排放、高推

重比、高性能的需求, 发动机燃烧室出口温度不断提高。燃烧室的研究是一个复杂庞大的系统工作, 燃烧室出口温度有众多影响因素, 燃油雾化性能是其重要

收稿日期: 2023-05-06 **基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金(3122022040)、中央高校基本科研业务费自然科学基金重点项目(3122023045)、天津市科技局科技计划项目自然科学基金多元基金项目面上项目(23JCYBJC00110)、重庆市自然科学基金(2024NSCQ-MSX1756)资助
作者简介: 何振鹏(1985), 男, 博士, 教授。

引用格式: 何振鹏, 袁茂强, 黎子维, 等. 离心喷嘴内部流动与雾化特性数值模拟[J]. 航空发动机, 2025, 51(1): 59-64. HE Zhenpeng, YUAN Maoqiang, LI Ziwei, et al. Numerical simulation of internal flow and atomization characteristics of centrifugal nozzle[J]. Aeroengine, 2025, 51(1): 59-64.

影响因素之一^[1]。喷嘴的喷雾形态、雾化锥角、雾化场的分布等雾化性能对燃烧室的稳定性、可靠性、工作效率等有着很大影响^[2-3]。深入研究离心喷嘴内部液体动态雾化过程,掌握喷雾特性的动态变化规律,对离心喷嘴设计与改进、发动机燃烧性能提高具有重要意义。

燃油雾化中所蕴含的多相流问题一直是燃烧领域的重点研究内容。Rizk等^[4]、Lefebvre^[5]利用试验总结了流量系数、液膜厚度、喷雾锥角、喷雾粒径等相关参数的经验公式,指出液滴索泰尔平均直径(Sauter Mean Diameter, SMD, 记为 D_{32})与出口液膜厚度的0.4次方即 $\delta^{0.4}$ 成正比;Som等^[6]通过对燃油温度的研究发现,燃油温度越高,雾化后的液体速度越大,液体质量流量越高;Lee等^[7]观察到液体随韦伯数增大,其喷雾形态依次呈滴落形、扭曲铅笔形、洋葱形、郁金香形及完全发展形5种形态;张永良^[8]利用透明玻璃喷嘴将喷嘴内部可视化,观察到离心喷嘴出口液膜的表面存在扰动,随着压降的增大,扰动的频率会加快,液膜破碎的贯穿距离随之缩短;Jeng等^[9]基于任意拉格朗日-欧拉算法(Arbitrary Lagrange-Euler, ALE)和有限体积法模拟了喷嘴直径为18 mm的轴对称压力雾化喷嘴的内部流动和液膜运动规律;白青松等^[10]采用界面捕捉(Volume of Fluid, VOF)方法结合正交试验研究了喷嘴的内部流动及结构参数对雾化特性的影响规律,结果表明喷嘴喉道处的形状是影响雾化锥角的重要因素;高玉超等^[11]对3种不同内壁结构的喷嘴在纯气相的情况下进行数值模拟,发现喷嘴的自激振荡频率均与气体质量流率成正比;金义等^[12]针对燃气轮机燃烧室中的直射式气动雾化喷嘴开展了数值模拟,研究发现气液两相间相对速度是影响喷嘴雾化性能的决定因素,相对速度增大有利于减小 D_{32} ,并增大雾化锥角。对于燃油破碎的两相流研究,难点在于相界面的捕捉。在湍流数值模拟计算中,分为直接模拟法(Direct Numerical Simulation, DNS)和非直接数值模拟法,邵长孝等^[13-15]通过DNS与Level-Set结合法对旋转射流雾化进行了直接数值模拟,对旋转射流的液膜、液滴的形成展开研究。但DNS方法的资源消耗巨大,成本较高,在某些方面难以实现喷嘴的复杂流动模拟。相比于其他模拟方法,VOF模型可以利用较少的CPU计算更复杂多变的相变化过程^[16],得到的结果能够很好地与理论吻合,整体上相对于理论公式能更为直观地与试验结果相结合^[17]。

喷嘴内部的流动细节对整个喷雾的宏观特性有着重要影响,试验研究很难直接获取喷嘴内部的流动

细节,而数值模拟能大幅度降低研发成本,缩短研发周期。本文基于大涡模拟模型,利用VOF方法建立了离心喷嘴燃油雾化气液两相流模型,研究了双路离心喷嘴副油路单路工作时在不同供油压力条件下的雾化特性,对喷嘴内部填充过程与液滴破碎机理展开深入研究,为后续喷嘴优化设计提供一定参考。

1 研究对象

1.1 物理几何模型

本文采用双路离心喷嘴,将整个模型进行简化后,喷嘴尺寸如图1所示。从图中可见,2个燃油反向切向入口与旋流室上腔相通,旋流室上腔直径 $D=1.1$ mm,整个旋流室长度 $L=1.8$ mm,喷口直径 $d=0.7$ mm。

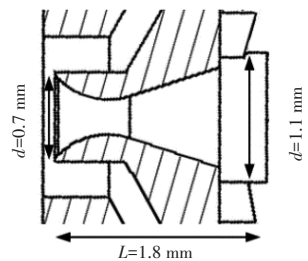


图1 喷嘴尺寸

计算模型以该离心喷嘴流域进行3维建模后利用Fluent Meshing划分网格,计算域网格如图2所示。喷嘴计算域包括4个主油路进油口、2个反向切向副油路进油口、旋流室、旋流室下腔喉道及直径=10 mm、高=7 mm的雾化场。靠近壁面的位置采用3层边界层加密网格,为了提高计算精度,将旋流室上游部分划分为粗网格,下腔利用体积影响加密法进行加密。由于结构复杂,采用Poly-Hexcore网格减小计算误差,提高计算效率。

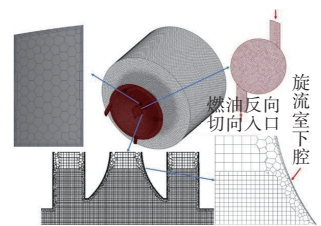


图2 计算域网格

为了更好地捕捉两相流分布,在喷嘴出口区进行不同程度的网格加密,将简化后的计算域模型进行网格无关性验证,选用815万、939万及1330万3种不同数量网格进行验证,3种网格密度下喷嘴轴向流速对比如图3所示。从图中可见,速度变化一致性较好,满足大涡模拟对网格计算的精度要求,考虑计算量与成本,本文选用815万网格进行数值计算。

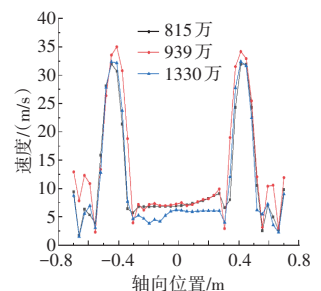


图3 3种网格密度下喷嘴轴向流速对比

1.2 VOF模型

VOF方法最早是由Hirt等^[18]提出的一种线性插值方法,VOF方法适用于任何2种流体之间不可压且

无滑移的计算。该方法通过求解 1 组动量方程和 1 个或多个连续性方程从而追踪到每一个网格中的相界面。VOF 方法通过 1 个标量场函数来表征相的体积分数,标量场函数记为 α ,本文选取空气为主相,煤油则为次相,当 $\alpha=0$ 时,求解单元中全部为空气;当 $0<\alpha<1$ 时,求解单元中为空气和煤油的混合相;当 $\alpha=1$ 时,求解单元中全部为煤油。在最初设定的体积分数分布中,体积分数的输运方程为

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

式中: \vec{v} 为速度矢量; α 为体积分数; t 为时间。

气液两相混合区内流体的密度和黏度表达式为

$$\begin{cases} \rho = (1 - \alpha)\rho_g + \alpha\rho_l \\ \mu = (1 - \alpha)\mu_g + \alpha\mu_l \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_g, ρ_l 分别为空气与液体的密度; μ_g, μ_l 分别为空气与液体的黏度。

1.3 边界条件

采用基于压力的求解器进行数值求解,压力速度耦合方式采用隐式算子分割压力(Pressure Implicit with Splitting of Operators, PISO)的算法。入口为压力入口,压力大小为 0.12~2.70 MPa;出口为压力出口,表压为 0 Pa;壁面处采用标准壁面函数处理。将空气定义为第 1 相,煤油定义为第 2 相,煤油密度为 801.8 kg/m³,表面张力系数为 0.0263 N/m。在入口处规定煤油的体积分数(Volume Fraction)为 1,空气的则为 0,即表明在模拟开始时入口全部为煤油相;出口处定义煤油体积分数为 0,即表明煤油喷出后不再返回。选用基于动力学原理的低雷诺数湍流模型(Wall-Adapting Local Eddy Viscosity Model, WALE)作为破碎模型。收敛标准为出口处流量不再变化,即残差小于 1×10^{-3} ,结合计算模型和收敛的要求,时间步长取为 2×10^{-8} ,1 个时间步长内迭代 20 次,库朗数取 1。

1.4 数学模型验证

为得出较准确的喷雾锥角角度,在喷嘴出口截面处作直径线,取该处轴向、径向、切向速度,定义雾化半锥角函数^[19-20]为

$$\beta = \left(\arctan \sqrt{\frac{v_r^2 + v_t^2}{v_a^2}} \right) \times \frac{180^\circ}{\pi} \quad (3)$$

式中: v_r 为径向速度; v_t 为切向速度; v_a 为轴向速度。

为更好地模拟喷嘴内部相的分布,本文将同数量网格分别用于 $k-\varepsilon$ 、RSM、LES 3 种模型进行模拟,3 种湍流模型模拟结果对比如图 4 所示。与试验对比后发现 $k-\varepsilon$ 模型误差为 19.02%,RSM 误差为 29.52%,

LES 误差为 6.18%,最终选取 LES 模型。

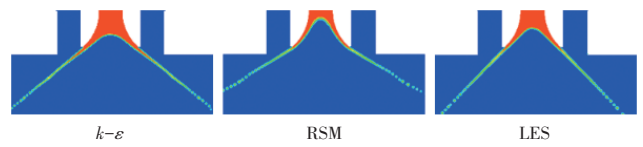


图 4 3 种湍流模型模拟结果对比

2 喷嘴内部填充过程分析

燃油流经旋流室到喷出喷嘴的填充过程如图 5 所示。在液体自身动能的驱动下,当 $t=0.06$ ms 时液体从 2 个切口射入旋流室,进入旋流室后紧贴旋流室内壁沿切向方向做旋流运动,此时液体的切向速度不断增加;当 $t=0.085$ ms 时,液体撞击到另一侧旋流室内壁,与另一侧液体相互撞击,在紧贴旋流室内壁的地方开始形成液膜。

当 $t=0.135$ ms 时,刚形成的液膜遇到喷嘴内部结

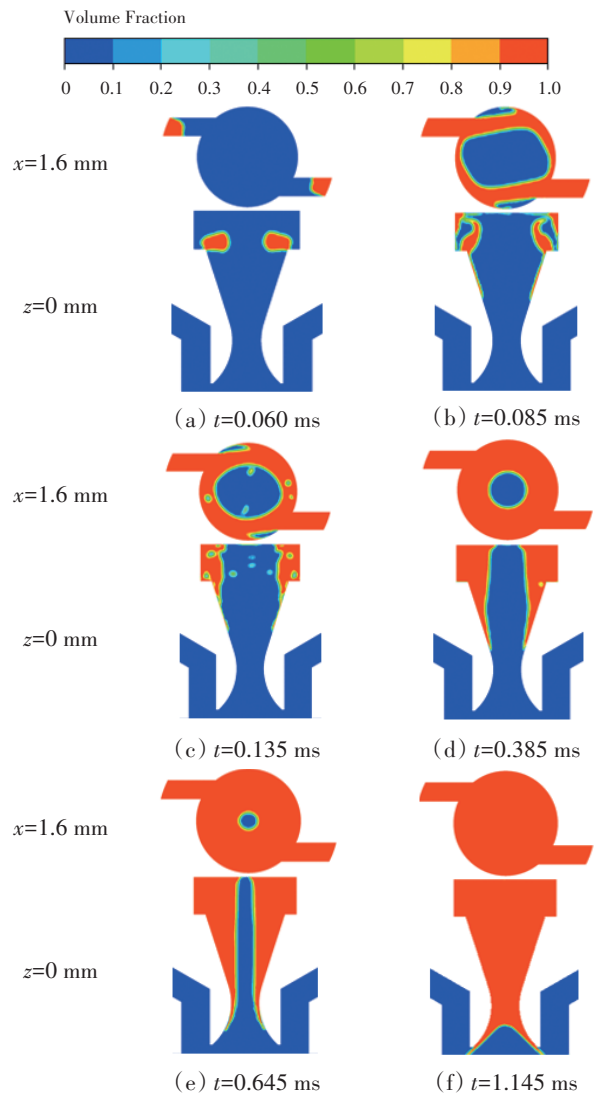


图 5 喷嘴内部燃油填充过程

构曲率突变,在进入旋流室收缩段的下腔时出现极不稳定的振荡现象,液膜与空气的扰动增强并出现褶皱,少量动量不均匀的液体以微团形式散落在旋流室内部并向下游移动,液体微团及液膜褶皱如图6所示。

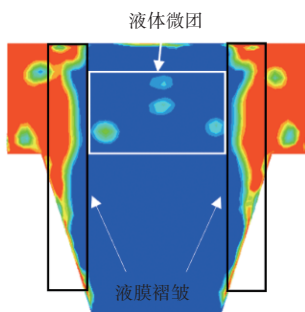


图6 液体微团及液膜褶皱

当 $t=0.385$ ms时,液体在旋流室头部逐渐形成均匀的液膜,由于离心力的作用,越靠近喷嘴中心位置切向速度越大,致使中间形成中心负压区,如图7所示。负压区积攒了大量空气,开始沿 z 方向形成1个尾部为锥形的空心涡(图7(b))。

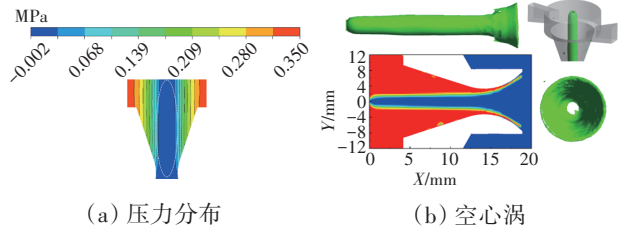


图7 中心负压区

随着旋流室内部液体增多,液体不断挤压中心负压区内空气,中心负压区逐渐减小,直至 $t=1.145$ ms时涡旋消失,喷雾锥角完全打开,如图8所示。

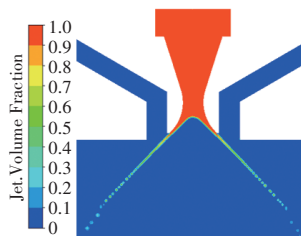


图8 喷雾锥角打开

3 喷嘴雾化场特性分析

3.1 不同供油条件下雾化场分析

不同供油压力下喷雾锥角变化趋势如图9所示。

研究表明,在低供油压力区时,燃油流量及速度开始逐渐增大,此时主导燃油扩散的主要原因是燃油黏性及速度,液体通过旋流室后,径向、切向扩散速度增大,液体旋流向外扩散增大雾化锥角,由于低压供油不稳定,致使雾化锥角变化迅速,张不开不稳定。当供油压力较低时,液体喷出喷嘴,喷嘴内外压差较低,喷射动量较小,造成二次破碎不均匀,致

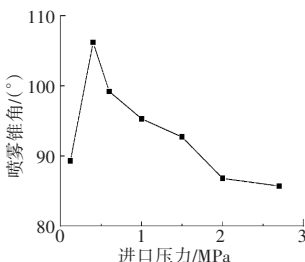


图9 喷雾锥角变化趋势

使锥角虽已经打开,但喷嘴附近存在严重的大液滴微团聚集。当供油压力增大到0.4 MPa时,锥角达到最大张开状态,继续增加供油压力,喷雾锥角开始逐渐减小,随着液体的动量比和入口压力的增大,液体的韦伯数会随之增大,主导雾化锥角变化的因素不再是液体的径向速度,受喷嘴物理结构的限制,旋流会形成与喷嘴结构导流壁面夹角相同的雾化角,最终雾化锥角稳定在 85.7° 左右,喷雾场也逐渐维持稳定。

不同压力下喷雾流线如图10所示,从图中可见,燃油在经过2个反向切向口进入旋流室后,在旋流室顶部出现2个小型涡结构(图10中A、B位置),出现涡结构的原因是由于在离心力和惯性载荷作用下,2股液体在轴向位置附近相遇,形成相互剪切作用,出现回流。

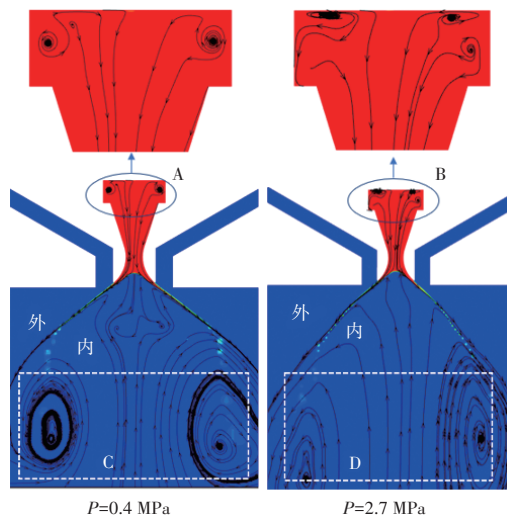


图10 不同供油压力下喷雾流线

在供油压力较低时,因初始燃油动能小,剪切作用不明显,相反,在供油压力较高时,液体湍动能大,因此,回流区涡结构在低供油压力时更加规律一些。当燃油离开喷嘴,进入到雾化场时,锥角完全打开,液体动能迅速增大,压力急剧减小,结合图7(b)结果,由于液体在填充喷嘴时尾部锥形空气涡的产生,最后液体在挤走空气后,锥角呈锥形向外流出,此时在液膜的内外两侧便形成压差,从而造成空气被卷入锥角内侧,形成回流区,沿周向位置形成涡环(图10中C、D区为涡环上的2个截面),锥角下游的涡结构与雾化锥角展开的大小有关,锥角大,则回流区覆盖面更广。燃油在尾部由于流体卷吸作用收缩并呈花苞状,结合图8结果,在锥角末端,正是由于流体的卷吸作用,液滴沿轴向方向下落。

3.2 不同供油条件下雾化机理分析

低、高 2 种不同供油压力下喷嘴出口处的液膜厚度对比如图 11 所示。在离心喷嘴出口处液膜呈环状结构,定义液相体积大于等于 0.3 时为液相区域,即在此形成液膜,利用商业软件求解计算,导出平均液膜厚度。当供油压力为 0.4 MPa 时,平均液膜厚度为 0.51 μm ,当供油压力增大到 2.7 MPa 时,液膜厚度大幅度减小至 0.34 μm ,液体分布更加均匀,更加有利于液膜的破碎与燃油雾化。

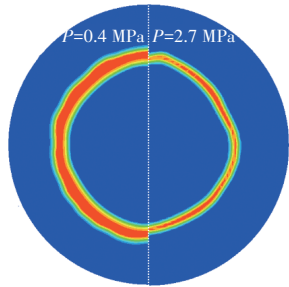


图 11 不同供油压力下出口液膜厚度

0.4 MPa 时液膜形态如图 12 所示。从图中可见,当进口压力为 0.4 MPa 时,由于韦伯数较小,液膜在喷出喷嘴后能保持完整形状。随着液体沿周向扩散,液膜不断地受到空气扰动,液膜底端的液丝液带出现了沿正弦方向传递的表面波(图 12 中红色部分),波长 λ 近似相等,产生该种波的原因是沿气相与液相交界面处存在不稳定性,自发产生了开尔文-赫姆霍兹(K-H)波,随着波沿正弦方向不断发展,液膜在空气扰动的因素影响下,表面张力不足以支撑液膜初始的形态,致使液体出现流体波动,从液膜剥离开来,最终发展成为液丝。

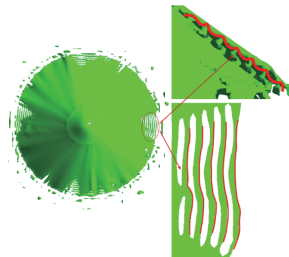
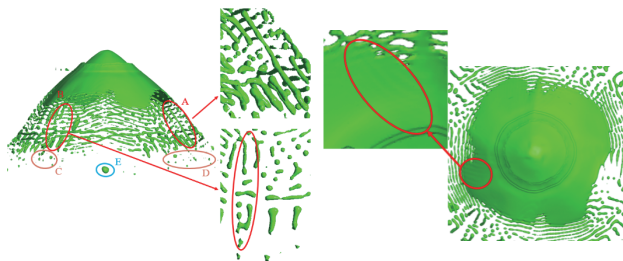


图 12 0.4 MPa 时液膜形态

2.7 MPa 时液膜形态如图 13 所示。从图中可见,当入口压力增大到 2.7 MPa 时,由于动量比和韦伯数的增大,结合图 12 中 0.4 MPa 时所呈现出的液膜周向破碎,发现当供油压力增大时,液膜开始大量往轴向破碎发展。从图 13(a)中 A、B 处可见有沿轴向方向发展的液带,结合图 13(b)中液膜有部分轴向褶皱,液膜在受到空气的扰动后在波谷处发生柱状破碎,液膜在向下游发展过程中,主导柱状破碎的 R-T 表面波开



(a) 液膜轴向破碎 (b) 液膜褶皱

图 13 2.7 MPa 时液膜形态

始不断传播。由于波的振幅不断增大,导致液带变细,在波谷处发生液体破碎,破碎后的小液滴(图 13(a)中 C、D 处)经过剥离、破碎后会与其他微小液滴发生二次聚合,形成更大的液体微团(图 13(a)中 E 处)。

出口处速度分布如图 14 所示。从图中可见,喷嘴出口处速度随供油压力增大而增大。

2 种不同供油压力下的液膜展开状态如图 15 所示。结合图 14 结果可知,在低供油压力下,液体在离开喷嘴出口时速度较小,此时液体获得的动能较小,液膜维持原状,在距喷嘴出口 0.7 mm 处液膜开始破裂,破碎方式以底部波浪式破碎为主,液膜破碎贯穿距离短,雾化效果不好;当供油压力增大到 2.7 MPa 时,液体获得的速度较大,与空气的扰动增强,液膜波动幅度增大,更加有利于液体沿周向破碎,液膜在离开喷嘴 0.2 mm 处开始破碎,开始呈液带状,随着液带进一步雾化,液带主要以穿孔式破碎为主。

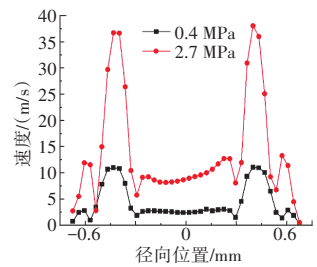
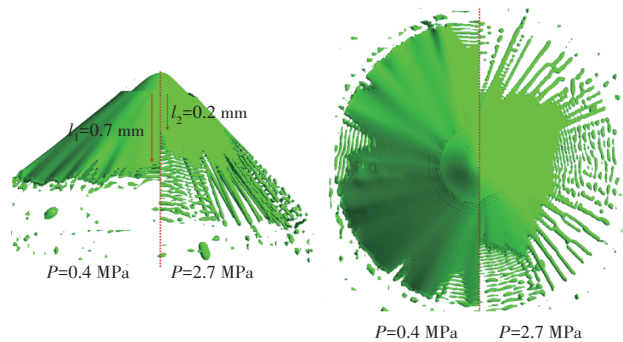


图 14 出口处速度分布



(a) 液膜前视 (b) 液膜俯视

图 15 不同供油压力下液膜展开状态

4 结论

(1) 在供油前期低压力供油时,影响雾化锥角的主要因素为湍流动能,随着供油压力不断增大,液体的径向扩散速度也随之增大,此时,受到喷嘴物理结构的影响,雾化锥角最终会稳定在与物理导流结构趋势相近的角度,整体趋势为先增大后减小。

(2) 液体在流经旋流室的过程中,伴随着气-液两相界面的振荡,液体首先会在紧贴内壁的地方做螺旋运动,逐渐形成中心负压区,中心负压区内会聚集大量空气形成空心涡,最终在 $t=1 \text{ ms}$ 左右时涡旋消失,锥角完全打开。

(3)在旋流室内部及锥角下游内侧,液体会产生回流区,导致雾化场出现涡结构,这种涡结构会影响气相与液相交错的分布,从而影响雾化场的结构。

(4)当入口压力较小时,此时液体的韦伯数较小,液体获得的动能小,主导液体破碎的因素是K-H不稳定性,K-H不稳定波会随着液膜沿着流向以正弦形式震荡传播,此时破碎方式以波浪式破碎为主;当压力增至2.7 MPa时,液体韦伯数和动量比增大,液膜开始出现柱状破碎,随着R-T波的传播,液带逐渐变细直至在波谷处发生破碎,最终形成沿轴向连续不断的小液滴。

参考文献:

- [1] 门玉宾,郑龙席,邵万仁,等.喷嘴特性对双旋流燃烧室出口温度分布影响的实验研究[J].推进技术,2023,44(11):2205078-1-8.
MEN Yubin, ZHENG Longxi, SHAO Wanren, et al. Experimental study on the influence of nozzle characteristics on temperature distribution at the outlet of a two-swirl combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(11): 2205078-1-8. (in Chinese)
- [2] 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,2006:1-20.
GAN Xiaohua. Aero gas turbine engine fuel nozzle technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 1-20. (in Chinese)
- [3] Som S K, Mukherjee S G. Theoretical and experimental investigations on the formation of air core in a swirl spray atomizing nozzle[J]. Applied Scientific Research, 1980, 36(3): 173-196.
- [4] Rizk N K, Lefebvre A H. Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers[J]. Journal of Propulsion and Power, 1985, 1(3): 193-199.
- [5] Lefebvre A H. Atomization and Sprays[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989: 68-80.
- [6] Som S, Longman D E, Ramirez A, et al. A comparison of injector flow and spray characteristics of biodiesel with petrodiesel[J]. Fuel, 2010, 89(12): 4014-4024.
- [7] Lee S, Kim W, Yoon W. Spray formation by a swirl spray jet in low speed cross-flow[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 559-568.
- [8] 张永良.离心喷嘴雾化特性实验研究和数值模拟[D].北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2013.
ZHANG Yongliang. Experiment and numerical studies on the atomization of a pressure atomizer[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2013. (in Chinese)
- [9] Jeng S, Benjamin M, Jog M. Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simplex fuel nozzle[J]. AIAA Journal, 1998, 36(2): 201-207.
- [10] 白青松,吴阳,侯力.某航空燃油喷嘴雾化特性分析及结构优化[J].上海交通大学学报,2023,57(1):84-92.
BAI Qingsong, WU Yang, HOU Li. Atomization characteristics analysis and structure optimization of an aviation fuel nozzle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(1): 84-92. (in Chinese)
- [11] 高玉超,楚威,苏凌宇,等.内壁结构对气体中心式同轴离心喷嘴喷雾特性影响[J].航空动力学报,2024,39(5):20220360-1-15.
GAO Yuchao, CHU Wei, SU Lingyu, et al. Gas-centered swirl coaxial injectors spray with variable inner wall structures[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(5): 20220360-1-15. (in Chinese)
- [12] 金义,张轲,尹家录,等.直射式气动雾化喷嘴对燃烧室性能的影响[J].航空发动机,2023,49(5):29-33.
JIN Yi, ZHANG Ke, YIN Jialu, et al. Influence of plain-jet air-blast atomizer on combustion chamber performance[J]. Aeroengine, 2023, 49(5): 29-33. (in Chinese)
- [13] 邵长孝,罗坤,樊建人.旋转射流雾化的直接数值模拟研究[J].工程热物理学报,2017,38(3):103-106.
SHAO Changxiao, LUO Kun, FAN Jianren. Direct numerical simulation of swirling liquid atomization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(3): 103-106. (in Chinese)
- [14] 邵长孝,罗坤,陈松,等.一种模拟液体雾化的守恒型 Level Set 方法[J].工程热物理学报,2015,36(8):1717-1720.
SHAO Changxiao, LUO Kun, CHEN Song, et al. A mass conserving level set method for simulation of liquid atomization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(8): 1717-1720. (in Chinese)
- [15] 邵长孝.液体旋流雾化的直接数值模拟研究[D].杭州:浙江大学,2017.
SHAO Changxiao. Direct numerical simulation of liquid swirling atomization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [16] 王栋.物性参数对离心喷嘴内部流动及雾化性能影响研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2019.
WANG Dong. Investigation on the flow and atomization characteristics of centrifugal nozzle under physical parameters[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019. (in Chinese)
- [17] 张亚,刘倩,谢恒.切向孔直径精度对离心喷嘴性能影响[J].航空动力学报,2021,36(12):2537-2544.
ZHANG Ya, LIU Qian, XIE Heng. Influence of precision of tangential port diameter on performance of swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(12): 2537-2544. (in Chinese)
- [18] Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [19] 孔德英,雷勇,任庆丰.发动机燃烧室离心式喷嘴喷雾角的数值仿真[J].计算机仿真,2007,24(10):45-47,52.
KONG Deying, LEI Yong, REN Qingfeng. Numerical simulation of spray angle in aeroengine combustor swirl atomizer[J]. Computer Simulation, 2007, 24(10): 45-47, 52. (in Chinese)
- [20] Biswas G, Som S K. Coefficient of discharge and spray cone angle of a pressure nozzle with combined axial and tangential entry of power-law fluids[J]. Applied Scientific Research, 1986, 43: 3-22.

(编辑:刘静)