

文章编号:1674-8190(2017)01-058-10

# 某离心式喷嘴雾化特性及优化设计研究

马朝<sup>1</sup>,黎明<sup>1</sup>,索建秦<sup>1</sup>,冯华仲<sup>2</sup>,刘伟琛<sup>1</sup>,邱思槐<sup>1</sup>

(1.西北工业大学 动力与能源学院,西安 710129)

(2.贵州黎阳天翔科技有限公司 研发中心,贵阳 550081)

**摘要:** 喷嘴结构参数、喷油压降和燃油物性对喷嘴雾化特性具有重要影响。采用数值计算和试验手段研究某离心式喷嘴航空煤油和0#柴油雾化特性及差异性,并讨论喷嘴内部流动和喷嘴结构参数对雾化特性的影响。结果表明:数值计算与试验值存在差异,但雾化锥角、流量系数等随压力变化的趋势一致,验证了流体体积函数(VOF)追踪油气两相界面的正确性;喷嘴内部气、液相的涡是内部流动不稳定和气液面波动的原因;几何结构参数对喷嘴雾化特性影响明显;优化后的喷嘴结构,流量系数和雾化锥角分别增大了0.15和0.16倍,而喷嘴出口液膜厚度减小了0.53倍,明显改善了该喷嘴的雾化质量。

**关键词:** 离心式喷嘴;流体体积函数;雾化特性;雾化锥角;优化设计

**中图分类号:** V235

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.01.009

## Study on Atomization Characteristic and Optimum Design of a Centrifugal Nozzle

Ma Zhao<sup>1</sup>, Li Ming<sup>1</sup>, Suo Jianqin<sup>1</sup>, Feng Huazhong<sup>2</sup>, Liu Weichen<sup>1</sup>, Qiu Sihuai<sup>1</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(2. R&D Center, Guizhou Liyang Tianxiang Technology Co. Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The geometry parameters, injection pressure drop and fuel property of the nozzle are of importance to study the atomization quality of the nozzle. Numerical simulation and experimental technologies are used for the study of atomization and differences of swirl atomizers which are supplied with aviation kerosene and 0# diesel oil. Different geometry parameters are analyzed to investigate their influence on the atomization. The internal flow field is also revealed through this study. The results indicate that there is deviation between numerical simulation and experiments, but the trends of spray cone angle and flow coefficient varying with pressure present highly conformity, which verifies that using the fluid volume function(VOF) to track the oil and gas two phase interface is properly for the study. The vortices in the liquid phase and gas phase are the motive for instable flow, which leads to the waves on the liquid sheet. Geometry parameters make a big difference on the atomization. After optimizing the structure of the nozzle, the flow coefficient and the spray cone angle are increased by 0.15 times and 0.16 times, respectively. The liquid film thickness of the nozzle outlet is decreased by 0.53 times, which obviously improves the atomization quality of the nozzle.

**Key words:** centrifugal nozzle; VOF; atomization characteristics; spray cone angle; optimal design

## 0 引言

燃油喷嘴是燃气轮机关键部件,其雾化质量的

优劣对燃烧室性能有着非常关键的影响,例如喷嘴的雾化特性直接影响燃烧室的燃烧效率、污染排放、燃烧稳定性、点火及再点火可靠性、出口温度分布等性能<sup>[1]</sup>。工程应用中很多限制燃烧室发展的燃烧问题都是通过优化现有喷嘴,重新设计或提出新的雾化概念来解决<sup>[2-3]</sup>,因此喷嘴设计及优化是燃烧室设计的重要组成部分和关键技术。

喷嘴按照雾化方式可分为离心式喷嘴、蒸发

收稿日期:2016-12-15; 修回日期:2017-01-04

基金项目:贵州省科技重大专项字[2014]6018号

通信作者:马朝, mz52111@163.com

管、气动喷嘴、复合式喷嘴等。一般气动喷嘴和复合式喷嘴的中间为离心雾化,因此离心式喷嘴是燃气轮机喷嘴的主要应用形式。此外,离心式喷嘴因其结构简单和雾化质量好等优点,被广泛应用于电站锅炉、内燃机、工业喷雾干燥、农业喷雾等领域。

对于离心式喷嘴的雾化特性参数,例如雾化锥角、液滴平均直径、液膜厚度、破碎长度等,已有相关的公式和结论。N. Dombrowski 等<sup>[4]</sup>对离心式喷嘴内部低黏性流体的流动情况进行推导,得到了喷嘴的液膜厚度和雾化锥角,同时得出了液滴平均直径和液膜厚度的平方根成正比的结论;A. H. Lefebvre<sup>[5]</sup>和 N. K. Rizk 等<sup>[6]</sup>通过对离心式喷嘴进行大量试验得到雾化粒径、液膜破碎长度等经验公式,为喷嘴的设计提供重要参考依据;李伟民等<sup>[7]</sup>和赵云惠等<sup>[8]</sup>对离心式喷嘴通过光学测试手段,获得了离心式喷嘴液滴尺寸分布及喷嘴下游液雾特性随径向距离变化的规律。

随着近代流体力学的发展,应用流体体积函数(Fluid Volume Function,简称 VOF)方法追踪气液两相界面被提出,使离心式喷嘴内部流动过程得到了很好地揭示。岳明等<sup>[9]</sup>基于 VOF 方法研究了某种离心式不同压降对喷嘴内部气液两相流场的影响,并得到了喷雾锥角、液膜厚度等参数,其结果与试验较好符合;刘娟<sup>[10]</sup>基于 VOF 方法研究了离心式喷嘴结构参数对雾化特性的影响。

目前国内外对离心式喷嘴雾化特性研究较多,

但针对喷嘴(大量使用)的结构参数、燃油物性参数等对其雾化特性的影响的研究较少。本文在上述研究的基础上利用试验手段和数值计算方法,系统地研究喷嘴结构参数、喷油压降和燃油物性对喷嘴雾化特性的影响,揭示喷嘴内部两相流不稳定性及喷嘴近喷口液膜破碎机理,同时给出影响喷嘴雾化质量的关键因素,以期为同类型喷嘴设计及结构优化设计提供技术支持。

## 1 雾化特性试验

燃油运动粘度、表面张力和供油压力是影响燃油雾化质量的主要因素。两种不同燃油的主要物性参数如表 1 所示<sup>[11-12]</sup>。由于航空煤油(RP-3)运动粘度和表面张力大于 0# 柴油,理论分析可预测在相同供油压力下 RP-3 的雾化质量好于 0# 柴油。

表 1 燃油主要物性参数

Table 1 Main physical parameters of fuels

燃料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	低位热值/ ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ )	运动粘度/ ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	表面张力/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )
0# 柴油	823	约 42 676	3.00~8.00	0.027 47
RP-3	780	$\geq 42\ 800$	$\geq 1.25$	0.023 00

### 1.1 试验系统

试验系统包括喷嘴试验台、气源系统、供油系统、控制及测试采集系统,如图 1 所示。

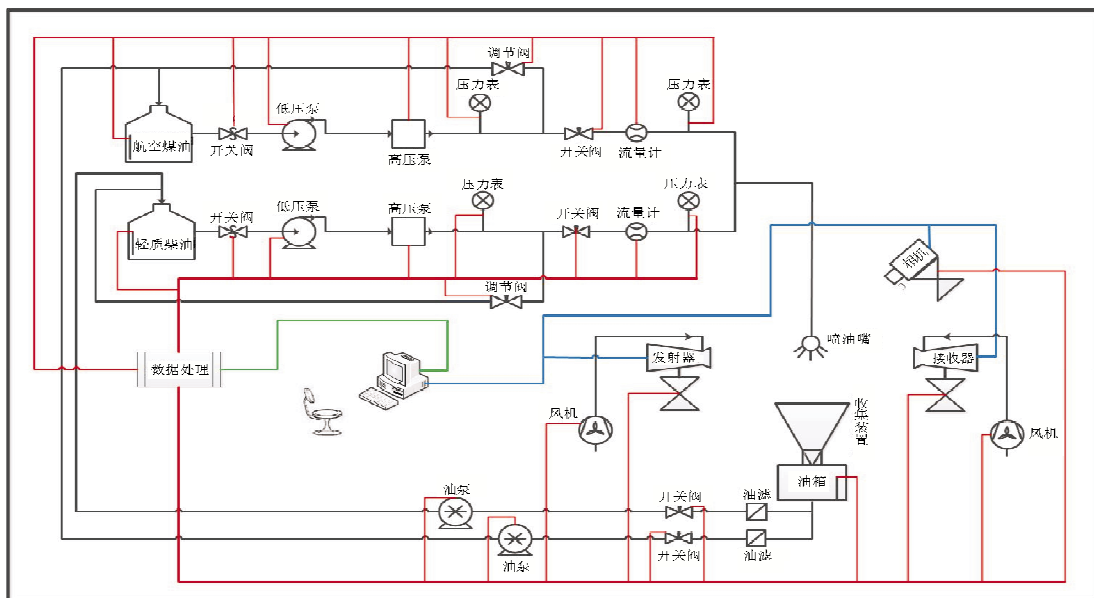


图 1 试验系统

Fig.1 Testing system

试验利用 Winner318A 型激光粒度分析仪和 ImageJ 图像处理软件完成喷嘴在真实工作工况下 RP-3 和 0# 柴油的索太尔平均直径 (Sauter Mean Diameter, 简称 SMD)、雾化锥角和流量系数随压力变化的趋势以及两种不同燃料之间的差异性对比。燃油压力测量采用麦克 MPM480 压阻式压力变送器, 燃油流量由德国 KEM 涡街流量计进行测量。燃油流量和燃油压力均配合 ADAM-3014 数据采集模块以及计算机程序对信号进行采集、转换和记录。流量系数是通过测量管路流量和喷嘴前压力, 应用计算公式(1)获得。

$$M = AC_d \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho} \quad (1)$$

式中:  $A$  为喷嘴出口面积;  $\Delta P$  为喷嘴压降。

N. K. Rizk 等<sup>[18]</sup>定义喷嘴喷雾锥角中心线与液膜边界之间的夹角为雾化锥角半角, 在本文试验和数值计算中采用该方法确定雾化锥角。

## 1.2 试验结果及分析

试验以 RP-3 和 0# 柴油为介质, 基于主、副油路研究两种燃料的雾化特性及压力对喷嘴的影响, 结果如图 2~图 5 所示。可以看出: ①副油路和主油路打开后两种燃料的 SMD 随着喷油压力的增加明显减小, 同时 0# 柴油的雾化特性相对较差, 主油和副油供油压力分别在 1.4 和 1.2 MPa 以上时, 其 SMD 均大于煤油的 SMD; ②主油打开后雾化锥角随着压力的增大呈现整体增大趋势, 在相同供油压差下, 柴油雾化锥角均大于煤油, 最大相差 4°; ③副油 RP-3 雾化锥角随着压力的增大逐渐增大, 而 0# 柴油随着压力的变化先减小后增大, 可能原因是副模尺寸较小, 对粘度和表面张力敏感性较复杂; ④该喷嘴使用 0# 柴油的雾化质量相对较差。

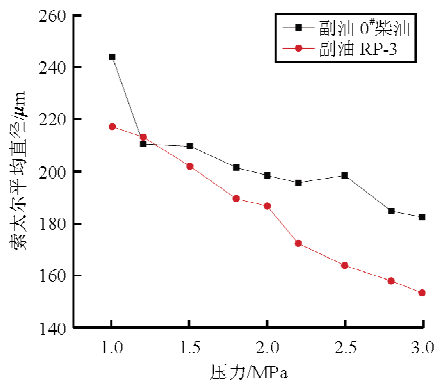


图 2 副油路索太尔平均直径随压力的变化关系  
Fig. 2 Relationship between SMD and pressure of auxiliary circuit

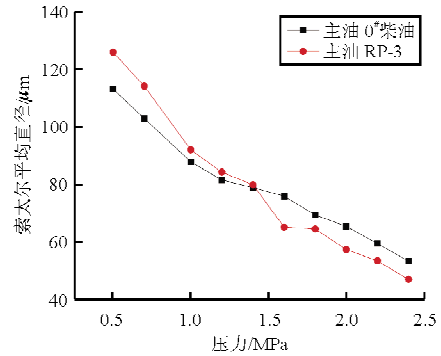


图 3 主油路 SMD 随压力的变化关系  
Fig. 3 Relationship between SMD and pressure of main circuit

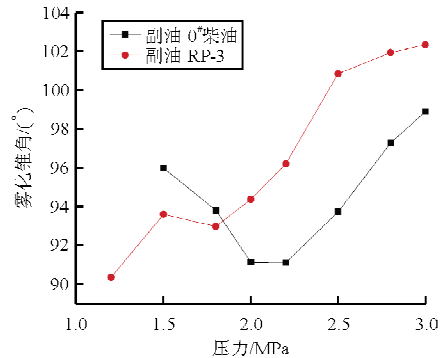


图 4 副油路雾化锥角随压力的变化关系  
Fig. 4 Relationship between atomization cone angle and pressure of auxiliary circuit

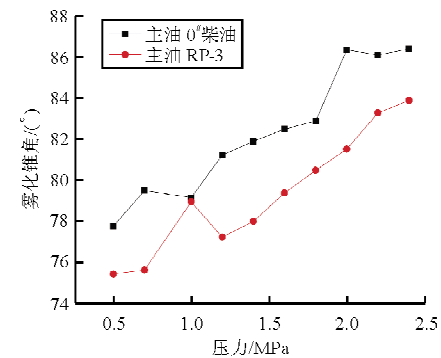


图 5 主油路雾化锥角随压力的变化关系  
Fig. 5 Relationship between atomization cone angle and pressure of main circuit

## 2 数值计算

基于试验结果, 建立 1:1 真实模型 (主油路流体域, 如图 6 所示), 并划分全结构网格, 网格数为 72 万和 90 万左右。采用隐式非定常计算, 气液面采用几何重构格式, 压力与速度耦合采用 PISO, 同时基于 VOF 模型研究离心式喷嘴内部流场及雾化特性。

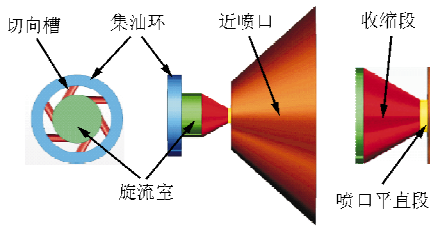


图 6 离心式喷嘴主油路流场

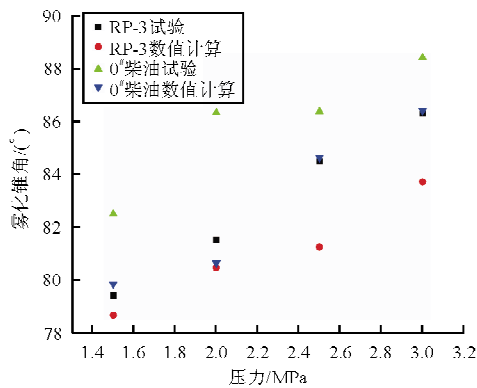
Fig. 6 Main oil path fluid field of a centrifugal nozzle

### 2.1 数值计算方法验证

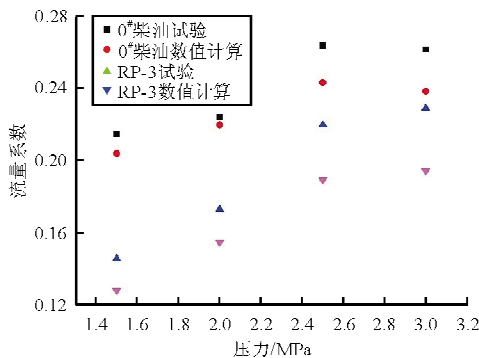
为了验证数值计算的可行性,进行网格无关性验证,并与试验值对比,结果如表 2 和图 7 所示。

表 2 网格数量对计算结果的影响  
Table 2 Influence of grid number on calculation results

网格数	液膜厚度/mm	喷口雾化锥角/(°)	喷口流量系数
72 万	0.380 76	80.629	0.238 1
90 万	0.381 25	81.003	0.237 3



(a) 雾化锥角随供油压力的变化



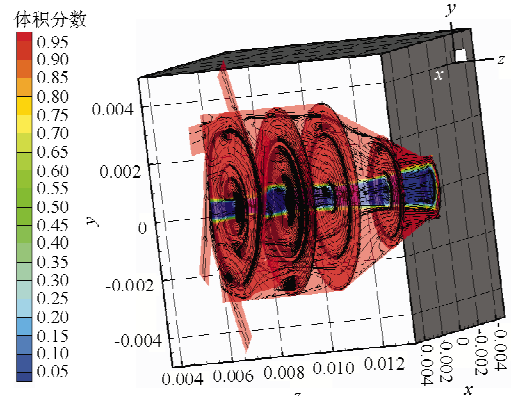
(b) 流量系数随供油压力的变化

图 7 数值计算结果与试验结果比较  
Fig. 7 Comparison between numerical results and test results

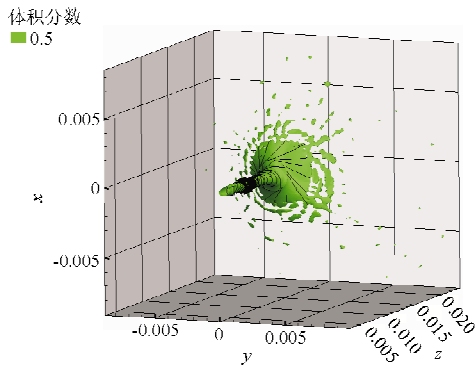
从表 2 和图 7 可以看出:①72 万网格能够很好地模拟喷口出口的参数,液膜厚度的误差在 0.129%之内,喷口雾化锥角的误差在 0.464%之内,喷口流量系数的误差在 0.336%之内,为了节省计算资源,本文采用 72 万网格模型完成后续研究工作;②数值计算所得的雾化锥角、流量系数均小于试验结果,但其随着压力变化的趋势和不同燃料之间的差异性与试验结果一致,可以验证数值计算中采用 VOF 方法的可行性,即可使用该方法进一步完成喷嘴内部流动、喷嘴雾化特性以及喷嘴结构参数对雾化特性影响的研究;③燃油流量系数随着压力的增大而增大,且在相同压力下 RP-3 航空煤油的流量小于 0# 柴油,如图 7(b)所示。

### 2.2 内部流动及雾化特性

高压燃油通过切向孔或槽进入旋流室,经过收缩段加速进入平直段。液体在喷嘴内部的高速旋转使喷嘴轴中心形成低压区,喷嘴口外界的空气在逆压差作用下进入喷嘴内,在喷嘴轴中心产生空气锥,和液体在喷嘴出口形成环形液膜,随后液膜在扰动波的作用下破碎,形成由大量不同尺寸的液滴组成的空心雾锥<sup>[5]</sup>。整个过程涉及气液两相流、涡流、湍流,同时在液相和气相区域存在大小不同和非对称的点涡、螺旋涡、环形涡。气液交界面(气、液体积分数均为 0.5)存在收缩和扩张,并且产生强烈的扰动,这种扰动称为静止波<sup>[14-15]</sup>,其产生的原因可能是液相中围绕空气锥的环形涡。此外,在气液交界面上大小不对称的涡也会加强气液面的扰动,尤其是在喷嘴出口区域比较强烈,使液膜破碎成碎片、小液柱,加强了燃油的一次雾化。液膜碎片和液柱与空气进一步相互作用(液滴表面张力和所受气动力),使其变为更小的液滴,完成燃油的二次雾化,如图 8 所示。



(a) 喷嘴内部流场与液相体积分数叠加图



(b) 气液交界面分布与其面上流线叠加图

图 8 喷嘴内部流动及液膜破碎过程

Fig. 8 Internal flow and liquid film breakup process of nozzle

燃油雾化是气液不断混合、相互作用的过程，喷嘴液相在不同时刻的体积分数分布如图 9 所示。

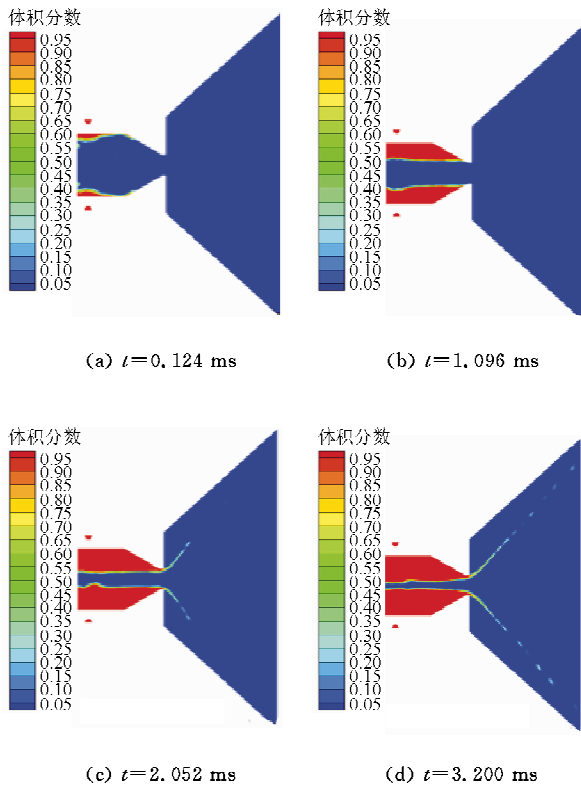
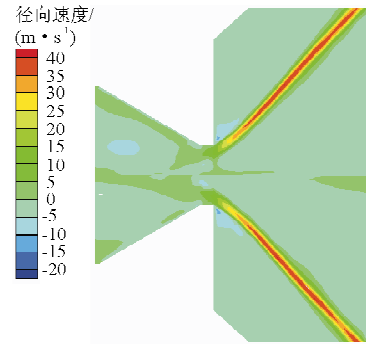
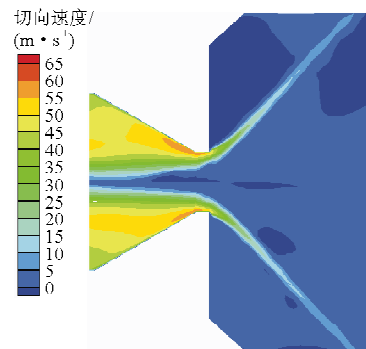


图 9 喷嘴轴向截面上不同时刻液相体积分数分布  
Fig. 9 Distribution of volume fraction of liquid at different times in the axial section of nozzle

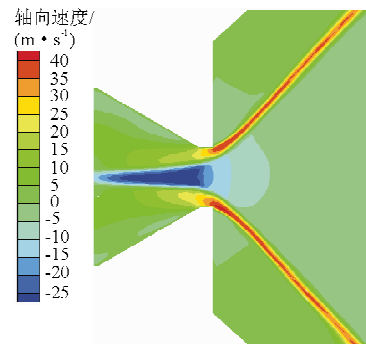
喷嘴内部区域速度分布及(气)液相分布如图 10 所示。



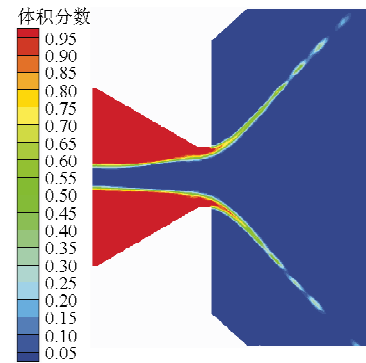
(a) 轴向截面上径向速度分布



(b) 轴向截面上切向速度分布



(c) 轴向截面上轴向速度分布



(d) 轴向截面上燃油体积分数分布

图 10 喷嘴轴向截面上速度及气液两相分布图  
Fig. 10 Distribution of nozzle velocity and gas-liquid two-phase flow in the axial section of nozzle

从图 10(a)可以看出:径向速度在收缩段比较小,而在平直段和喷嘴出口区域径向速度迅速增大,这是雾化锥角形成并逐渐打开的原因。从图 10(b)可以看出:切向速度在气液界面处比较大,且喷嘴出口液膜切向速度沿着轴向逐渐降低,说明旋流室和收缩段液相旋流强度比较大,而在喷嘴出口开始逐渐减弱,同时平直段部分轴向速度和切向速度转化为径向速度。从图 10(c)~图 10(d)可以看出:轴向速度在气液界面处比较大,且从平直段到喷嘴出口区域迅速增大,说明液相主要是通过气液界面区域进入等直段,也是液膜在喷嘴区域逐渐变薄的原因。

从平直段入口到喷嘴出口,速度、压力(压差)以及液相体积分数分布如图 11~图 13 所示,可以进一步说明在近喷嘴口区域径向速度、切向速度和轴向速度的变化、大小以及之间的转化关系。

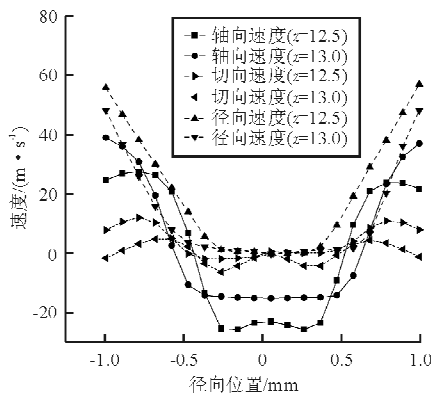


图 11 平直段前后速度变化

Fig. 11 Velocity changes of straight segment

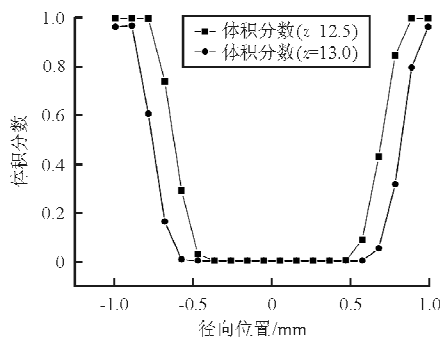


图 12 平直段前后液相体积分数变化

Fig. 12 Mass fraction of liquid changes of straight segment

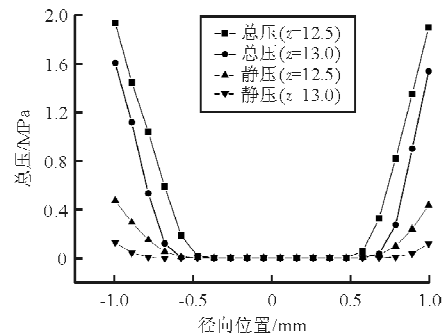


图 13 平直段前后压力变化

Fig. 13 Pressure changes of straight segment

从图 11~图 13 可以看出:沿着平直段到喷嘴口径向速度逐渐增大,促使液膜逐渐变薄;在平直段,从气相区向液相区过渡,其压力不断增大,相对静压,总压从 2 atm 增大到 18 atm,增大更加明显,而从平直段到喷嘴口,静压和总压不断减小,而气相的压力一直在 0 附近。

### 2.3 结构参数对雾化特性的影响

冷态试验是研究喷嘴性能的关键方法。通过改变喷嘴口径直径  $D$ 、平直段长度  $L$ 、喷嘴口出口倒角(以下简称“喷口倒角”)  $\theta$  等参数的大小,如表 3 所示。通过四种方案研究其对喷嘴流量系数、近喷嘴液膜厚度、近喷嘴雾化锥角以及液膜破碎长度的影响。当改变某个参数时,其他参数为基准参数,介质为 0# 柴油。

表 3 喷嘴结构参数

Table 3 Structure parameters of nozzle

方 案	平直段长度/mm	喷口直径/mm	喷口倒角/(°)
基 准	0.500	2.2	0
方 案 1	0.250	1.8	15
方 案 2	0.375	2.0	30
方 案 3	0.750	2.4	45
方 案 4	1.000	2.6	60

#### 2.3.1 流量系数

液力粘性、摩擦损耗以及旋流强度较大的气液两相流导致离心式喷嘴的有效流通面积和流量系数较小。N. K. Rizk 等<sup>[6,16]</sup>对离心式喷嘴性能参数进行了全面而深入的研究,在大量试验基础上得到流量系数与喷嘴口径存在一定的关系。此外,理论分析认为平直段长度和喷口倒角对摩擦损耗

都有一定的影响,也会对流量系数产生一定影响。流量系数随结构参数的变化关系如图 14 所示。

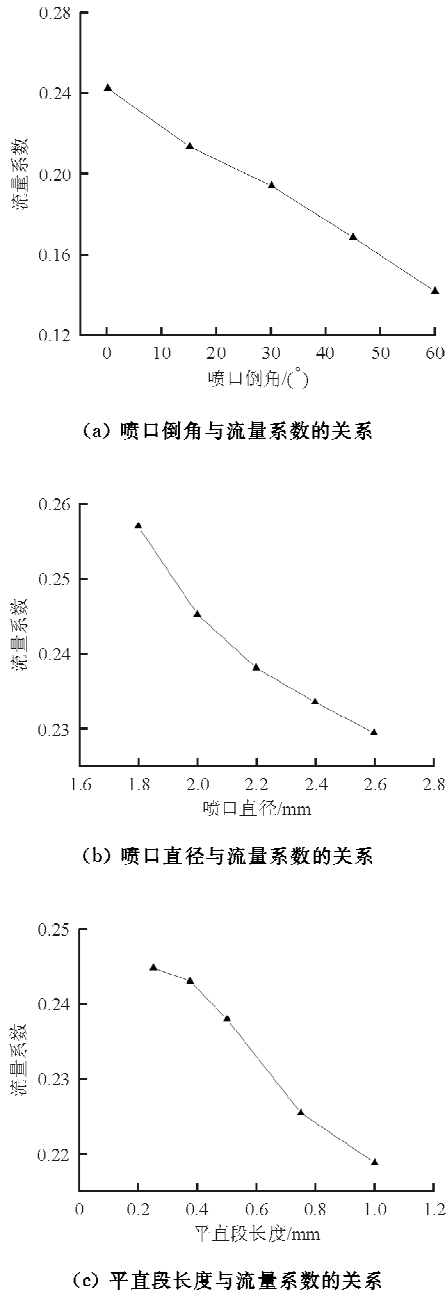


图 14 流量系数随结构参数的变化关系

Fig. 14 Relationship between flow coefficient and structural parameters

从图 14 可以看出:①流量系数随着喷嘴直径、喷嘴倒角以及平直段长度的增大而减小,这与 N. K. Rizk 等<sup>[6,16]</sup>的研究结果以及理论分析结果一致;②喷嘴倒角对喷嘴的流量系数影响相对较大,60°相对 0°减少了将近 71.00%。

### 2.3.2 液膜厚度

喷嘴口区域油膜由锥形破碎为碎片状或者柱状,完成燃油的一次雾化。喷嘴口液膜厚度对燃油一次雾化有着非常重要的影响, A. H. Lefebvre 等<sup>[2,17]</sup>在 A. K. Jasuja<sup>[18]</sup>的基础上,得到  $SMD \sim \varphi^{0.39}$ ,  $\varphi$  为液膜厚度;同时田章福等<sup>[19]</sup>得出喷嘴倒角增大可以减小喷嘴液膜厚度,并可以增强气液的相互作用,有利于液膜的破碎。计算结果如图 15 所示。

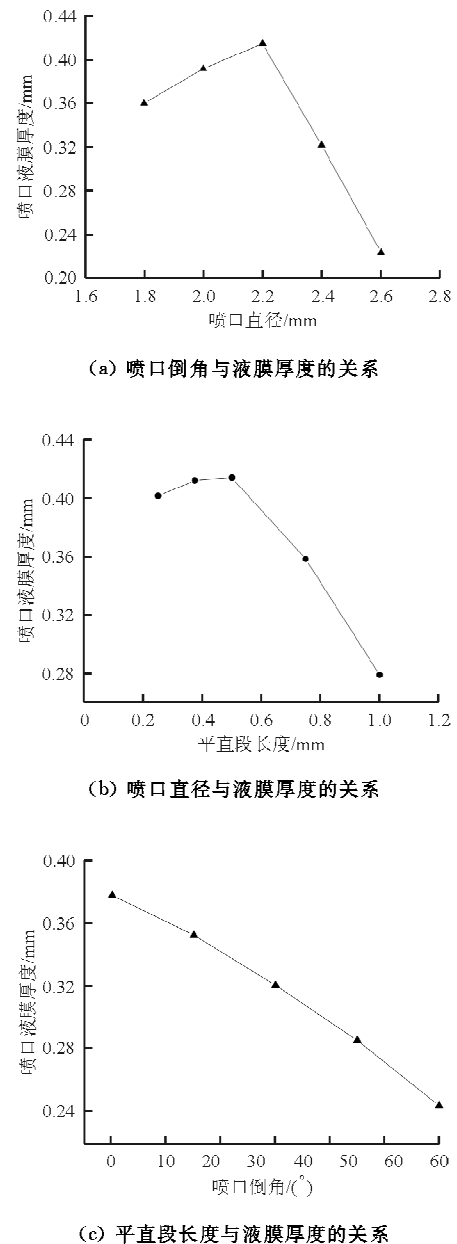


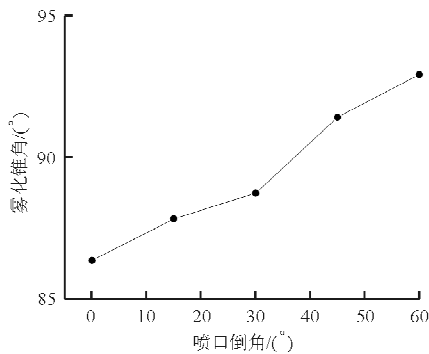
图 15 喷嘴液膜厚度随结构参数的变化关系

Fig. 15 Relationship between nozzle film thickness and structural parameters

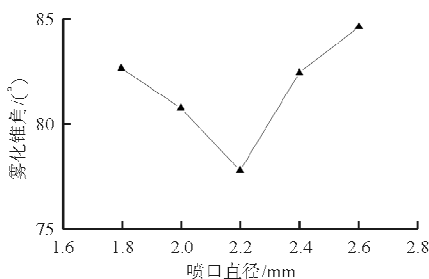
从图 15 可以看出:喷口直径和平直段长度对喷口液膜厚度均呈现出先增大后减小的影响,存在一个最大值 ( $L = 0.5 \text{ mm}$ ,  $D = 2.2 \text{ mm}$ ,  $\varphi = 0.4144 \text{ mm}$ );不断减小平直段长度,增大喷口直径,有利于喷嘴雾化,但 2.3.1 小节的计算结果表明其流量系数逐渐降低,而液膜厚度随着喷口倒角的增大而减小,这与田章福等<sup>[19]</sup>的研究结果吻合,60°相对 30°减少了 31.57%,有利于喷嘴雾化。

### 2.3.3 雾化锥角

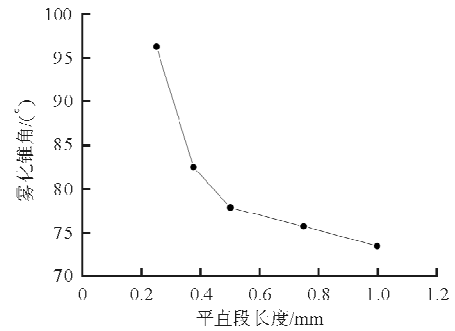
液膜雾化锥角是影响喷嘴雾化质量的重要因素,其增大有利于气液混合作用,促进液体的一、二次雾化,可以得到粒径更小、分布更均匀的雾化颗粒,对燃烧室的贫油熄火和高空点火十分有利。雾化锥角过大,在燃烧室中燃油容易喷到火焰筒壁,会产生积碳,不利于燃烧室寿命。此外,雾化粒径过小,其液滴在燃烧室或空气中穿透力迅速下降,所以合适的雾化锥角和 SMD 对组织燃烧非常重要。A. H. Lefebvre<sup>[2,5]</sup>对喷嘴(无/有粘性液体)的雾化锥角进行了充分的理论分析和大量的试验,得出雾化锥角与喷口直径、平直段长度、喷口倒角和液体物性都有很大关系,其之间的关系相对比较复杂。雾化锥角随结构参数的变化关系如图 16 所示。



(a) 喷口倒角与雾化锥角的关系



(b) 喷口直径与雾化锥角的关系



(c) 平直段长度与雾化锥角的关系

图 16 雾化锥角随结构参数的变化关系

Fig. 16 Relationship between atomization cone angle and structure parameters

从图 16 可以看出:平直段长度减小和喷口倒角变大都会使雾化锥角变大;喷口直径对雾化锥角的影响呈现出先减小后增大的趋势。

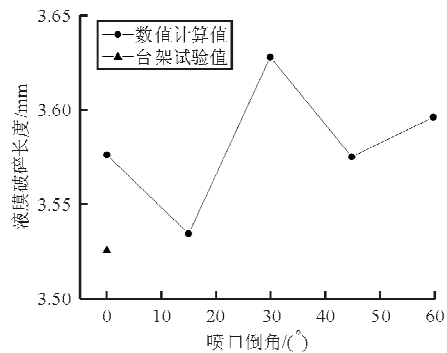
### 2.3.4 液膜破碎长度

离心式喷嘴雾化液膜破碎可分为小韦伯数下的穿孔破碎和大韦伯数下的湍流破碎。关于液膜破碎, D. Cooper 等<sup>[14]</sup>研究表明在喷嘴口气液界面不断增强扰动的静止波使锥形液膜破碎成碎片、液柱或大液滴,完成一次雾化。由于液膜破碎过程比较复杂且其形态随着工况变化差异性较大,很难精确定义液膜破碎长度。Z. Han 等<sup>[20]</sup>通过理论分析和大量试验得出液膜破碎长度的半经验公式为

$$\lambda = 3 \left( \frac{\rho_l \sigma 12 \varphi \cos \theta}{\rho_g^2 v^2} \right)^{0.5} \quad (2)$$

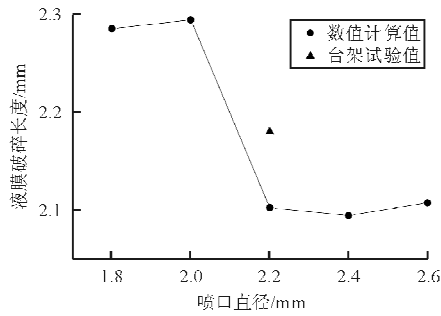
式中:  $\rho_l$  为燃油密度;  $\rho_g$  为气体密度;  $\sigma$  为燃油表面张力;  $v$  为喷嘴口液体相对空气的速度。

利用公式(2)得到液膜破碎长度与台架雾化试验值(液膜破碎成片状的位置与喷嘴口的垂直距离为液膜破碎长度)对比及其与结构参数之间的关系,如图 17 所示。

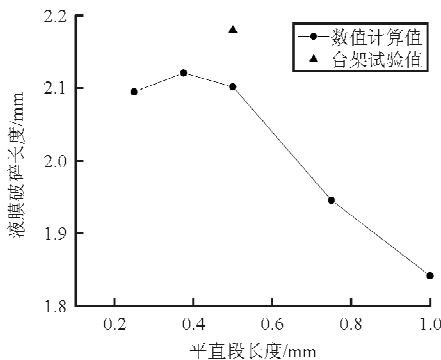


(a) 喷口倒角与破碎长度的关系





(b) 喷口直径与破碎长度的关系



(c) 平直段长度与破碎长度的关系

图 17 破碎长度随结构参数的变化关系

Fig. 17 Relationship between breaking length and structural parameters

从图 17 可以看出:通过公式(2)计算的结果与试验值基本一致;相对其他雾化特性参数,结构参数对液膜破碎长度的影响相对较小。

## 2.4 结构参数优化数值验证

### 2.4.1 优化模型

基于 1.2 小节的试验和 2.3 小节的数值计算结果,将喷口倒角改为  $60^\circ$ ,喷口直径改为 2.6 mm,平直段长度改为 0.25 mm。

### 2.4.2 优化计算结果

燃油为 0# 柴油,供油压差为 3.0 MPa,计算对比结果如表 4 所示。

表 4 优化结构与原型结构计算结果对比

Table 4 Comparison of calculated results between optimized structure and prototype structure

结 构	液膜厚度/ mm	雾化锥角/ ( $^\circ$ )	流量系数	破碎长度/ mm
原型结构	0.414	77.78	0.238	2.102
优化结构	0.218	90.16	0.275	2.115

从表 4 可以看出:结构优化后喷嘴的雾化特性得到明显改善,其中喷口液膜厚度相对原型结构减小了 0.53 倍左右,根据  $SMD \sim \varphi^{0.39}$  可以看出 SMD 减小了 0.35 倍左右;雾化锥角从  $77.78^\circ$  增大到  $90.16^\circ$ ,使喷嘴出口附近的液膜与更多空气相互作用,促进燃油雾化和提高燃烧室(该喷嘴装配的环管燃烧室)的头部雾化质量、燃油蒸发速率,进而提高燃油的燃烧质量;流量系数提高了 0.15 倍左右,增强了喷嘴的燃油流通能力;液膜破碎长度几乎没有发生变化,这与 2.3.4 小节中计算的结果一致。

## 3 结 论

(1) 压力、表面张力和运动粘度对喷嘴副油路的雾化锥角和 SMD 影响较大,燃料改变后燃烧室的点火装置需优化改进。

(2) 主油路打开后,SMD 值基本保持不变,而雾化锥角增大,但其差异不大,可保证火焰筒头部尺寸基本不必调整。

(3) 喷嘴内部流动是十分复杂的油气两相流动过程,气液相和气液界面存在不同的涡,这是由于内部流动不稳定和气液界面收缩和扩张以及液膜初始破碎的原因。

(4) 喷口倒角对近喷口雾化特性影响较大,倒角越大,喷口雾化锥角越大,喷口液膜厚度越厚,流量系数越小,液膜破碎长度基本不变。

(5) 随着喷口直径增大,喷口液膜厚度先增大后减小,雾化锥角先减小后增大,流量系数减小,液膜破碎长度基本不变。

(6) 随着喷口直径增大,喷口液膜厚度先增大后减小,雾化锥角和流量系数减小,液膜破碎长度基本不变。

(7) 结构优化后,喷嘴的雾化质量得到明显改善,从而提高装配该喷嘴的燃烧室的燃烧特性和使用寿命。

## 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: 146-155.  
Gan Xiaohua. Aero gas turbine engine fuel nozzle technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006, 146-155. (in Chinese)
- [2] Lefebvre A H. Fuel effects on gas turbine combustion[J]. International Journal of Turbo & Jet Engines, 1986, 3(2/

- 3); 231-244.
- [3] Rizk N. Fuel atomization effects on combustor performance [C]// AIAA/ASME/SAE/ASEE Florida: Joint Propulsion Conference and Exhibit, Florida: Joint Propulsion Conferences, 2004; 393-411.
- [4] Dombrowski N, Hasson D. The flow characteristics of swirl(centrifugal) spray pressure nozzles with low viscosity liquids[J]. AIChE Journal, 1969, 15(4): 604-611.
- [5] Lefebvre A II. Atomization and sprays[M]. USA: CRC Press, 1988, 27-73.
- [6] Rizk N K, Lefebvre A H. Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers[J]. Journal of Propulsion and Power, 1985, 1(3): 193-199.
- [7] 李伟民, 王兴甫, 金如山. 离心式喷嘴下游液雾特性随径向距离变化的试验研究及分析[J]. 测控技术, 1985(4): 62-70.  
Li Weiming, Wang Xingfu, Jin Rushan. Experimental study and analysis on spray characteristics of centrifugal nozzle downstream liquid with radial distance change[J]. Measurement & Control Technology, 1985(4): 62-70. (in Chinese)
- [8] 赵云惠, 侯木玉, 孔祥祯, 等. 喷咀雾化液滴尺寸分布的研究[J]. 北京航空学院学报, 1984(3): 47-61.  
Zhao Yunhui, Hou Muyu, Kong Xiangzhen, et al. Investigation on droplet size distribution[J]. Journal of Beijing Institute of Aeronautics Astronautics, 1984(3): 47-61. (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] 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)
- [11] 许世海, 熊云, 刘晓. 液体燃料的性质及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010; 345-362.  
Xu Shihai, Xiong Yun, Liu Xiao. Properties and applications of liquid fuels [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010; 345-362. (in Chinese)
- [12] 张广林. 现代燃料油品手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009; 240-252.  
Zhang Guanglin. Modern fuel oil manual[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2009; 240-252. (in Chinese)
- [13] Rizk N K, Lefebvre A II. Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 1987, 4(1/2): 65-73.
- [14] Cooper D, Yule A J, Chinn J. Experimental measurements and computational predictions of the internal flow field in a pressure swirl atomizer[C]// 15<sup>th</sup> Institute for Liquid Atomization and Spray Systems-Europe Conference. Manchester Escholar, 1999.
- [15] Cooper D, Yule A J. Waves on the air core/liquid interface of a pressure swirl atomizer[C]// 17<sup>th</sup> Institute for Liquid Atomization and Spray Systems-Europe Conference. Manchester Escholar, 2001.
- [16] Rizk N K, Lefebvre A II. The influence of liquid film thickness on airblast atomization[J]. Journal of Engineering for Power, 1980, 102(3): 706-710.
- [17] Lefebvre A H, Wang X F. Mean drop sizes from pressure-swirl nozzles[J]. Journal of Propulsion and Power, 1987, 3(1): 11-18.
- [18] Jasuja A K. Atomization of crude and residual fuel oils[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1979, 101(2): 250-258.
- [19] 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 on spray characteristic of gas-liquid coaxial injectors [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(4): 10-13. (in Chinese)
- [20] Han Z, Parrish S, Farrell P V, et al. Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel sprays[J]. Atomization & Sprays, 1997, 7(6): 663-684

### 作者简介:

马朝(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:燃烧室结构设计、喷嘴雾化及头部油气混合燃烧。

黎明(1965—),男,硕士,副教授。主要研究方向:先进燃气轮机燃烧室与燃烧技术。

索建秦(1962—),男,硕士,教授。主要研究方向:先进燃气轮机燃烧室与燃烧技术。

冯华仲(1969—),男,硕士,研究员。主要研究方向:热工技术及相关军用/民用装备。

刘伟琛(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:燃气轮机燃烧室燃烧与冷却。

邱思槐(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:燃气轮机燃烧室燃烧与贫油熄火。

(编辑:赵毓梅)