

文章编号: 1000-8055(2023)03-0588-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220444

喷嘴防积碳结构对燃油分布的影响

张荣幸, 杨大伟, 马 柱, 张书豪, 戴金鑫, 王 良

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 针对航空发动机双油路喷嘴, 采用试验和数值计算方法研究了不同防积碳结构对燃油分布的影响。采用光学分布式喷雾检测系统进行燃油分布测量试验, 获取了不同防积碳喷嘴出口下游 20 mm 截面的锥角、周向分布和径向分布; 并采用 volume of fluid (VOF) 仿真方法对不同防积碳结构的喷嘴进行了数值仿真研究。结果表明: 相同供油压差下, 喷嘴匹配防积碳结构后, 喷雾锥角和燃油径向分布的峰值半径减小, 小半径区域燃油分布占比升高。计算结果与试验结果符合较好, 有效解释了防积碳气流对喷嘴燃油分布的影响。同一工况下, 喷嘴匹配不同防积碳结构时, 锥角的大小与喷口端面中心孔的气流速度相关, 而周向分布主要与气液比相关。

关 键 词: 喷嘴; 防积碳结构; 燃油分布; 喷雾锥角; 径向分布; 周向分布

中图分类号: V231.2⁺3

文献标志码: A

Effect of anti-carbon deposition structure on fuel distribution of nozzle

ZHANG Rongxing, YANG Dawei, MA Zhu, ZHANG Shuhao,

DAI Jinxin, WANG Liang

(Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: The effects of anti-carbon deposition structure on fuel distribution of aero-engine combustor double-way nozzle were investigated numerically and experimentally. Firstly, optical distributed spray detection system was applied to measure the fuel distribution, and the spray cone angel, circumferential and radial distribution of the section 20 mm downstream the nozzle outlet were obtained; the numerical simulation of the nozzle with different anti-carbon deposition structure was carried out by using VOF simulation method. The results showed that, under the same fuel pressure, the spray cone angel and peak radius of radial distribution decreased, while the proportion of fuel in the small radius increased, considering the effect of anti-carbon deposition structure of nozzle. The numerical calculation results were in good agreement with the experimental results, which can effectively explain the effect of anti-carbon flow on fuel distribution. Under the same fuel pressure and air pressure, when the nozzle was matched with different anti-carbon deposition structures, the spray cone angel was related to the velocity of the center airflow at the nozzle, and the circumferential distribution was mainly related to the gas-liquid ratio.

Keywords: nozzle; anti-carbon deposition structure; fuel distribution; spray cone angel; radial distribution; circumferential distribution

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0002-0026)

作者简介: 张荣幸(1991—), 女, 工程师, 硕士, 从事航空发动机燃烧室设计工作。

引用格式: 张荣幸, 杨大伟, 马柱, 等. 喷嘴防积碳结构对燃油分布的影响[J]. 航空动力学报, 2023, 38(3): 588-595. ZHANG Rongxing, YANG Dawei, MA Zhu, et al. Effect of anti-carbon deposition structure on fuel distribution of nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(3): 588-595.

双油路离心喷嘴和旋流器组合是目前小型发动机燃烧室主要雾化方式,在这种气动雾化喷嘴中,燃油从中心的离心喷嘴中喷出,冲击在文氏管上,形成一个薄的油膜,在文氏管出口边缘上,油膜破碎成条,然后迅速地进入了内外旋向相反的两股旋流的剪切层中雾化。剪切层中,破碎成条的油膜被进一步雾化,形成油雾^[1-2]。随着中小型航空发动机循环参数的不断提高,燃烧室的温升和热负荷均显著增加,导致喷嘴端面和旋流器积碳问题凸显,进而影响燃油喷嘴以及燃烧室的性能和寿命。小型发动机受尺寸限制,旋流器的尺寸较小,燃油散布空间有限,燃油喷嘴附近可能存在部分富油燃烧的火焰,极易造成喷嘴及文氏管内积碳^[3-5],喷嘴防积碳结构可提升文氏管中心速度,降低喷嘴温度,是一种有效防止喷嘴积碳的方式,但在小尺寸燃烧室上,喷嘴防积碳结构的气流将作用于燃油雾锥,影响旋流杯内燃油分布,目前国内外还没有针对小型发动机燃油喷嘴防积碳结构对燃油分布的影响研究。

国内外针对离心喷嘴以及离心喷嘴和旋流器组合的气动雾化喷嘴的燃油分布做了多项研究,研究的方式主要包括粒子图像测速仪(PIV)、平面激光诱导荧光(PLIF)以及相位多普勒粒子分析仪(PDPA)等^[6-8],激光全息投影技术同样可用于构建物体三维图像,获取液滴的三维分布情况^[9]。刘存喜^[10]建立了平面激光雾化诊断方法和试验平台,通过比较PDPA、Fraunhofer衍射和结合PLIF和米氏(Mie)散射二维粒径测试技术(LIF/Mie)的粒径测量结果,对LIF/Mie方法的有效性进行了验证,获取了供油压差对喷嘴锥角、液滴速度分布、燃油空间分布等参数的影响,并分析了中心轴截面的燃油径向分布。桂韬等^[11]通过PIV和高速摄影仪获得了不同旋流器与喷嘴组合的流场、油雾场形态以及SMD和分布指数 N ,研究认为该种雾化喷嘴主要是离心喷嘴本身起主导作用,空气雾化的效果有限。乔卿贝^[12]采用PIV和PLIF技术研究了受限空间内,预膜与射流组合式燃油喷嘴在高温高压下的雾化综合性能,获得了油气比、压降、进气压力、进气温度等条件下的组合式燃油雾化装置雾化特性及其影响规律。

为深入研究喷嘴雾化过程和燃油分布受气体作用的影响,还需借助仿真计算工具,目前捕获气液分界面的数值方法主要是volume of fluid (VOF)方法^[13-17]。Ishimoto^[18]采用LES-VOF方法

对直喷嘴的射流雾化进行了数值模拟,得到液体经喷嘴出口喷出的破碎过程和液滴的形成的过程,并对液膜破碎长度、液柱形状、液滴直径、雾化锥角和液滴速度分布等进行了研究分析。宫冠吉^[19]采用基于水平集-流体体积耦合(coupled level-set VOF, CLSVOF)的数值计算方法,对亚超剪切混合层的射流液柱破碎过程进行了模拟,探究了喷注方案及气动参数对油气空间分布的影响。张书铭^[20]选取带有径向旋流器的空心锥喷嘴作为研究对象,采用VOF与OpenFOAM结合,对二次雾化模型进行研究,该项研究主要用于粒径预测。多项研究表明:大涡模拟(large eddy simulation, LES)与VOF方法对雾化特性和油气空间分布的预测具有较高精度。

在双油路喷嘴上增加防积碳措施,需要考虑其对燃油分布的影响。目前国内外关于空气雾化喷嘴的油雾场的研究均没有考虑防积碳气对喷嘴下游燃油空间分布的影响,燃油从喷口喷出,无论采用哪种空气雾化方式,雾锥首先受防积碳气体的作用,该过程是一个耦合高速气流、燃油破碎雾化、油气两相混合的复杂过程,防积碳结构同样对该过程产生影响,因此本文采用试验和仿真方法结合,获取不同防积碳结构喷嘴的燃油分布,并根据仿真结果对其影响过程进行分析。

1 研究对象

本文的研究对象为航空发动机燃烧室双油路喷嘴,喷嘴壳体采用气体进行冷却,防止喷嘴积碳,如图1所示,图1(a)为喷嘴剖面图,图1(b)为喷嘴端面图。图中双油路喷嘴分为2路燃油,其中1路燃油处于喷嘴中心,喷口成喇叭状,2路燃油在1路外呈环形细缝状。防积碳结构的进气方

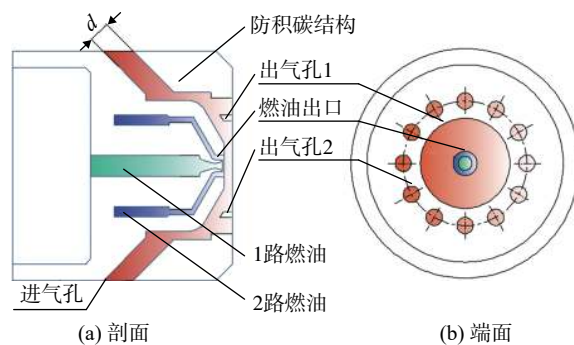


图1 带防积碳结构的双油路喷嘴示意图

Fig. 1 Schematic of double-way nozzle with anti-carbon deposition structure

式为孔, 直径为 d , 出气孔位于喷嘴出口端面, 有 1 个中心孔(出气孔 1)和多个小孔(出气孔 2)。

本文主要研究四种不同防积碳结构对燃油分布的影响, 具体参数见表 1, 其中 n_{a1} 为进气孔的数

量, D_{a01} 为出气孔 1 的直径, n_{a02} 为出气孔 2 的数量, D_{a02} 为出气孔 2 的直径。

2 研究方法

2.1 试验系统

试验系统主要包括供油系统、供气系统、喷雾试验器, 如图 2 所示, 供气系统主要由储气罐、空气压缩机、阀门以及流量测量和压力测量组成, 供油系统主要由储油罐、油泵、过滤装置、阀门以及流量测量和压力测量组成。燃油和空气经过双油路喷嘴后, 形成油气混合物, 经由油气分离装置后, 燃油回到储油罐, 气体由排气系统排出。

表 1 防积碳结构设计参数

Table 1 Design parameters of anti-carbon deposition structure

参数	Model A	Model B	Model C	Model D
n_{a1}	6	12	12	12
D_{a01}/d	5.0	5.0	4.3	5.0
n_{a02}			12	12
D_{a02}/d			1.0	0.6

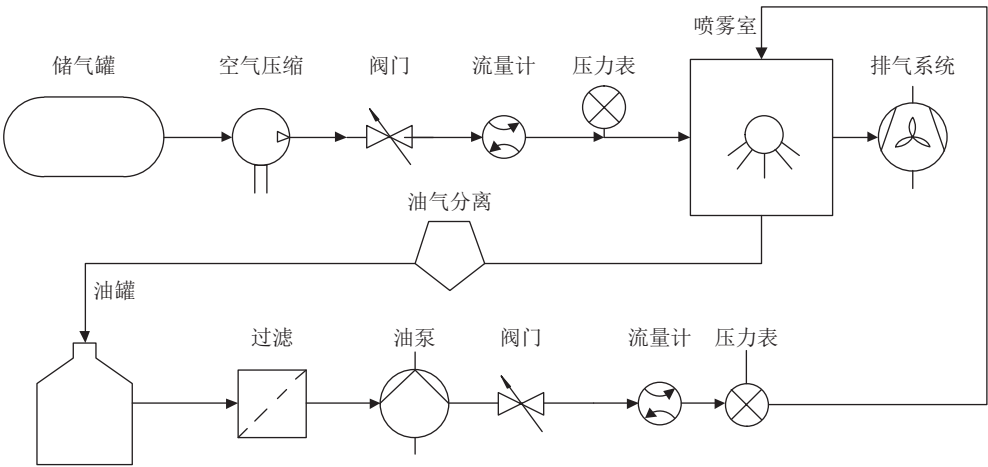


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic view of experimental facility system

测量系统为光学分布式喷雾测量系统, 包括: 光学分布式激光测量台(包含多路激光发生器和阵列接收器)、数据采集系统和后处理软件, 如图 3 所示。该测量系统基于激光切面成像技术, 其原理是采用激光切面使喷雾受光, 利用每单位容积的颗粒表面区域与图像亮度成一定对应关系的机理从而获得粒子的表面区域信息, 同时该系

统结合了消光技术和图像校准, 可以有效避免因激光衰减和二次喷射带来的误差。

测量系统试验前经过校准达到精度要求, 校准工具为中性密度消光滤纸, 标准消光系数为 0.5, 多束激光通过消光滤纸后, 测试系统获取的消光值在标准消光值的 $\pm 1\%$ 内。本文中激光由与喷嘴中心线垂直的方向射入, 激光射入平面即为测量截面。该系统测量所得为瞬态值, 设置每次测量时长为 12 s, 每秒钟测量 50 次, 取 600 次动态结果的平均值为该次测量的稳态结果, 随机误差在 $\pm 0.5\%$ 以下。稳态结果经过后处理软件系统, 可以获得测量截面上单位体积内颗粒表面面积, 进而通过处理该截面数据获取对应的喷雾角度、分布等。

2.2 数值计算方法

采用 FLUENT 商业软件对带防积碳气体的双油路喷嘴进行数值模拟计算, 湍流模型选择 SAS 模型, SAS(scale-adaptive simulation) 模型作

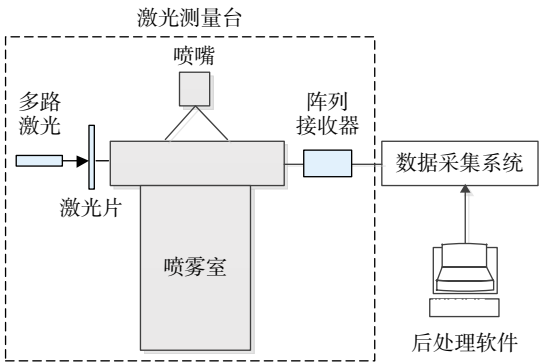


图 3 测量系统示意图

Fig. 3 Schematic view of measurement system

为混合 RANS(Reynolds average Navier-Stokes)/LES 方法之一, 比 LES 所需的计算资源少, 在两相流的非定常流动预测中兼具高精度和可承受性, 在工程应用中具有使用价值。两相流模型采用 CLSVOF 模型的方法捕捉气液交界面, 基于体跟踪的 VOF 方法通过指定的函数, 在网格不变的情况下实现界面重构, 获得两相的界面位置, 从而可以较准确地跟踪气液交界面的几何和拓扑结构变化, 本文中界面重构模型选择 Geo-Reconstruct 模型。VOF 选择显式算法。压力速度耦合方法为压力隐式分裂算子(PISO)格式, 各变量采用 2 阶格式进行离散。

利用 Workbench 中 Design Modeler 软件对流体域及喷嘴进行建模, 利用 Meshing 软件进行网格划分, 喷口和外流场采用结构化的六面体网格(Hex/Wedge), 旋流室和旋流槽采用非结构化的四面体网格(Tet/Hybrid), 壁面采用默认的无滑移条件。网格最大尺寸为 50 μm , 经过网格无关性验证, 确定总网格数目为 3 100 万, 图 4 为计算域的三维网格。

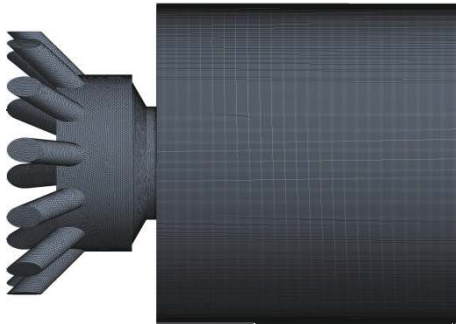


图 4 计算域的三维网格

Fig. 4 Three-dimensional grid of the computational domain

空气采用不可压缩理想气体, 黏度符合 Sutherland 黏性定律; 空气和燃油均采用压力入口边界, 压力出口边界; 设定的参考压力为 101 325 Pa, 参考压力点设在出口。

2.3 研究工况

试验及计算均给定压力值, 对比工况为空气压差为 0 kPa, 即不考虑防积碳气体对燃油分布的影响; 设计工况中燃油压差 Δp_f 为 2.2 MPa, 气体压差 Δp_a 为 12 kPa, 如表 2 所示。试验在常温常压下

表 2 研究工况

Table 2 Working condition of rasearch

参数	对比工况	设计工况
$\Delta p_f/\text{MPa}$	2.2	2.2
$\Delta p_a/\text{kPa}$	0	12

进行, 燃油和气体温度均为常温。

3 结果与讨论

3.1 试验结果及分析

在表 2 中对应的供气压差和供油压差下进行试验, 采集距喷口下游 20 mm 截面的燃油分布数据, 为详细对比不同防积碳结构的影响, 表 3 中给出设计工况下不同防积碳模型的气液比(air fluid ratio, AFR, 量符号记为 r_{af}), 即空气质量流量 q_{ma} 和燃油质量流量 q_{mf} 之比, 如式(1)所示:

$$r_{af} = q_{ma}/q_{mf} \quad (1)$$

表 3 设计工况下不同防积碳结构的气液比

Table 3 AFR of different anti-carbon deposition structure under design condition

模型	气液比
Model A	0.07
Model B	0.10
Model C	0.14
Model D	0.13

图 5 为对比工况和不同防积碳结构喷嘴在设计工况下的燃油分布试验结果, 该燃油分布是指测量截面位置处具有一定厚度的体积区域内的燃油粒子的表面积, 测量值与气体流量无关, 仅表征燃油的分布, 对比工况中不带防积碳气, 最大燃油分布(ω)为 0.026 mm^{-1} , 带有防积碳气时最大燃油分布为 0.055 mm^{-1} , 各个方案的燃油分布均不一致, 下文中将详细对比不同试验条件和不同防积碳气方案的锥角、径向分布和周向分布。

图 6 为对比工况和不同防积碳结构喷嘴的喷雾锥角试验结果和计算结果对比, 试验结果显示, 不带气体时, 喷雾锥角为 101°防积碳结构 Model A 和 Model C 对应锥角分别为 93°和 95°, 防积碳结构 Model B 和 Model D 对应锥角分别为 83°和 84°, 因此防积碳气体对会使得喷雾锥角减小, 且不同防积碳结构对喷嘴锥角影响的程度不同。各个方案计算结果的变化趋势与试验结果一致, 喷雾锥角计算误差均在 13% 以下, 因此本文认为采用计算结果对不同防积碳结构进行分析是合理的。

图 7 是燃油喷嘴匹配不同防积碳结构在设计工况下的燃油径向分布试验结果, 并与对比工况进行对比, 此时各个方案的供气压差和供油压差保持一致, 图中分布占比是指将测量截面分成多个等面积圆环, 半径为 R 所在的圆环内燃油质量

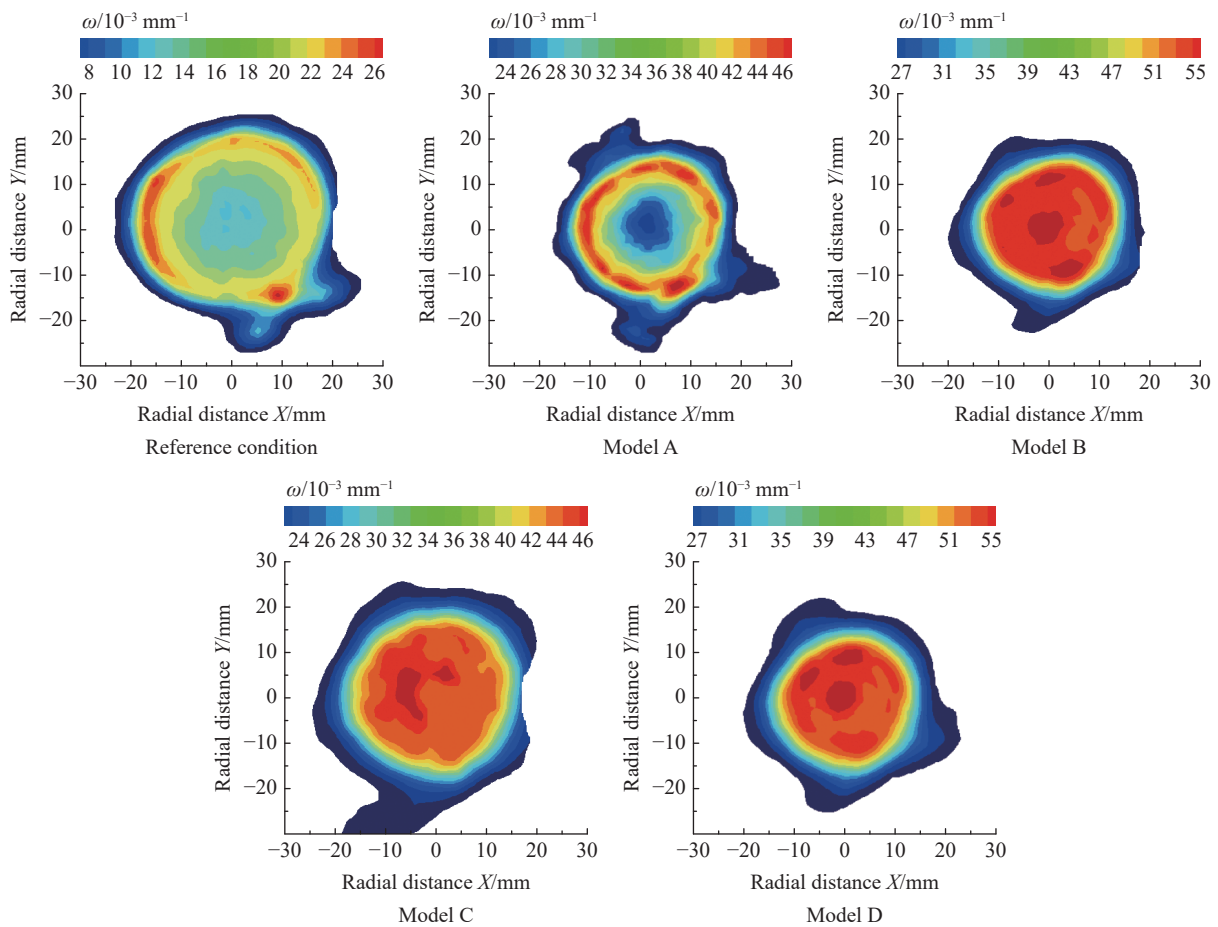


图 5 燃油分布试验结果

Fig. 5 Experiment results of fuel distribution

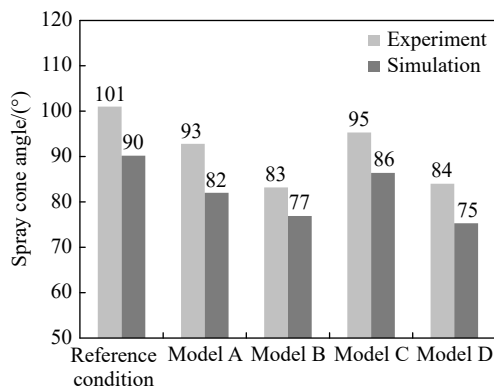


图 6 喷雾锥角的试验结果和计算结果

Fig. 6 Experiment and simulation results of spray cone angle

流量占总燃油质量流量之比,该指标仅表征燃油在径向上的分布情况,不考虑周向上的不对称, $R>0$ 侧为试验结果, $R<0$ 区域与之完全对称,仅用作分析。燃油喷嘴不带防积碳结构时,喷嘴的径向分布为双峰结构,这主要是由于该喷嘴为双油路喷嘴,1路和2路的燃油雾化锥角有一定差值;两个峰值点分别为(20.5 mm, 16.0%)和(24.5 mm,

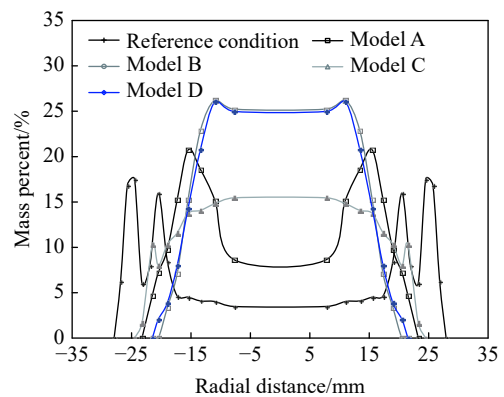


图 7 不同模型的径向分布试验结果对比

Fig. 7 Comparison of radial distribution experiment results of different models

17.5%),燃油主要分布在 $R\approx 19$ mm至 $R\approx 26$ mm区间,分布占比总和达80%, $R<19$ mm区域的燃油分布占比总和约20%。Model A的试验结果显示,燃油径向分布由原来的双峰分布变为单峰分布,峰值点为(15.5 mm, 20.7%),最大占比由原来的17.5%变成了20.7%左右,峰值半径 $R\approx 15.5$ mm,

较之前缩小了 10 mm 左右。Model B 的试验结果显示, 峰值点为(11 mm, 26.2%), 峰值半径比 Model A 缩小 4.5 mm, 在 $R < 10$ mm 区域, 分布占比总和增大到 25%, 燃油在小半径区域分布集中。Model C 的燃油径向分布试验结果有所不同, 在 $R < 20$ mm 区域内等面积占比均在 14% 左右, 即分布非常均匀, 未出现明显峰值。Model D 与 Model B 的径向分布基本一致。综上, 考虑防积碳结构后, 燃油径向分布的峰值半径以及燃油分布的径向边界半径都会减小, 雾化锥角变小, 半径 R 较小的中间区域燃油分布占比升高, 且不同的防积碳结构形式对燃油径向分布的影响不一致。增大吹积碳气量, 可有效增加喷嘴防积碳的效果, 但气液比增大, 在不增加端面小孔的情况下, 使得燃油分布集中, 可能导致燃烧室出口温度场恶化, 因此在增加吹积碳气量的同时增加较大尺寸的端面小孔可有效降低防积碳气对燃油分布的影响。

图 8 为不同模型燃油周向不均匀度试验结果, 周向不均匀度的定义如式(2)所示, q_{mf} 为测量截面在周向上均匀的分成 12 等分面积内获取的燃油质量流量, 不均匀度即燃油质量流量最大值和最小值之差与最大值之比。由图 8 可知, 考虑防积碳结构后, 燃油周向不均匀度均减小, 其中

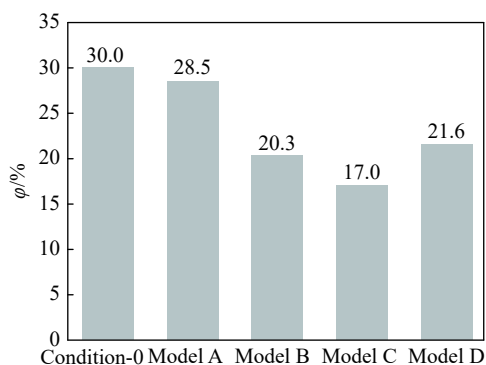


图 8 不同模型的周向分布试验结果对比

Fig. 8 Experiment result comparison of circumferential distribution between different models

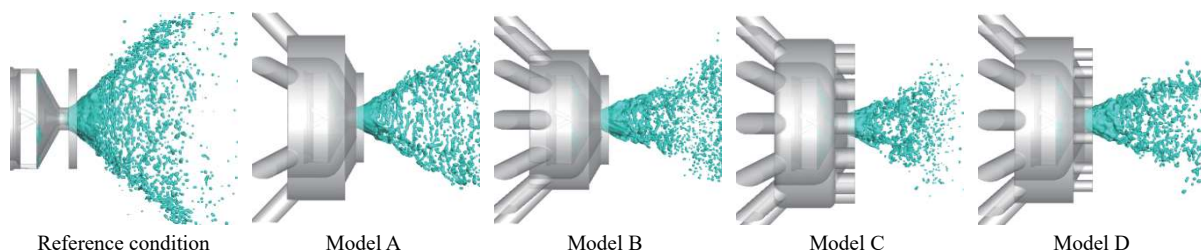


图 9 不同模型的仿真结果对比(相界面分数为 0.25)

Fig. 9 Simulation results comparison between different models (phase interface fraction 0.25)

Model C 中周向不均匀度最小。这主要是由于燃油从喷口喷出, 防积碳气流对燃油的作用力使得燃油粒子分散更均匀, 且随着气液比增大, 气流的作用力增大, 周向不均匀度减小。

$$\varphi = (q_{mfmax} - q_{mfmin}) / q_{mfmax} \quad (2)$$

3.2 计算结果及分析

图 9 为喷嘴匹配不同防积碳结构仿真结果, 相界面分数为 0.25, 图 10 为不同模型的速度及流场, 计算结果显示, 燃油喷嘴与不同防积碳结构匹配后, 雾化锥角均变小, 与试验结果一致。Model A 中燃油从喷口喷出后, 受气流作用最小, 下游锥角型面基本与喷嘴出口处一致, 这是由于 Model A 气液比相对最小, 气流速度同样较小, 喷口处速度在 50 m/s 左右, 喷口下游在 20 m/s 以下。Model B、Model D 与 Model A 相比, 气液比增大, 端面中心孔气流速度增大, 速度达到在 60 m/s, 对锥角的收缩作用更大, 这主要是由于液滴从喷嘴喷出后具有一定的轴向速度和径向速度, 匹配防积碳结构后, 气流同样从喷口处具有一定速度, 同样气压下, 不同结构的气流速度不一致, 气流与液体动量交换同样不一致, 因此 Model B 和 Model D 中, 气流速度更大, 导致燃油的切向速度减小, 锥角更小。Model C 中, 气液比大, 但由于喷嘴端面小孔较大, 喷嘴中心孔处气流速度较低, 因此喷雾锥角呈现出在喷口附较小, 到下游喷雾锥角逐渐增大的趋势, 且下游燃油粒子分散更为均匀。综上, 防积碳气的中心孔处气流大小及速度是影响燃油分布的关键因素, 增大防积碳气量可以获得更好的喷嘴防积碳效果, 但喷嘴的气液比达到 0.1 时, 防积碳气会使得燃油分布集中, 不利于燃烧室性能, 而增加端面小孔可在增大防积碳气量的同时有效降低中心孔的气流速度, 降低防积碳气对燃油分布的影响。

图 11 是喷嘴匹配不同防积碳结构的径向分布计算结果对比, 与上文中图 7 进行对比分析, 对

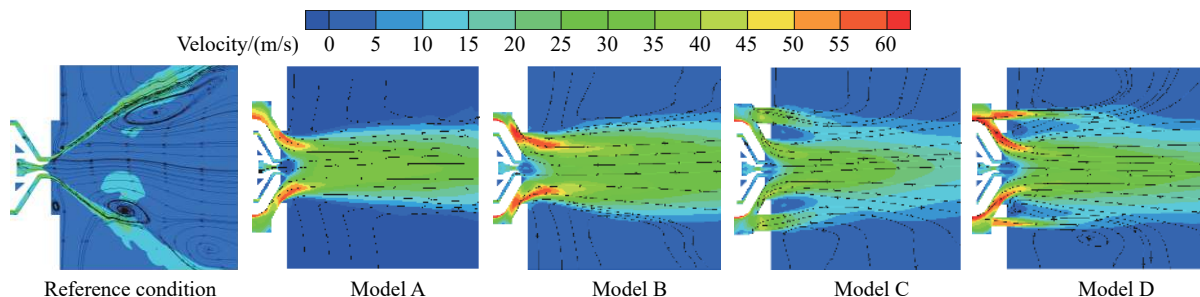


图 10 不同模型的速度及流场对比

Fig. 10 Velocity and flow pattern comparison between different models

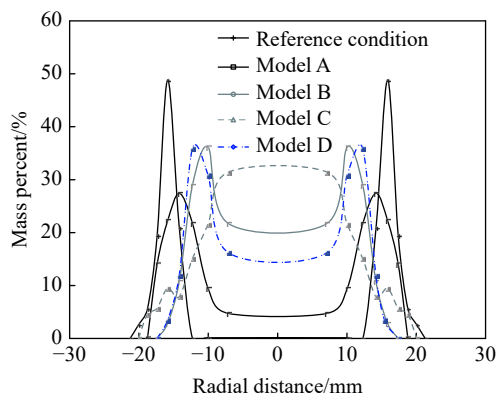


图 11 不同模型的径向分布计算结果对比

Fig. 11 Comparison of radial distribution simulation results of different models

比工况为不带防积碳结构。计算结果显示,燃油喷嘴不带防积碳结构时,喷嘴的径向分布为单峰结构,峰值点(16 mm, 48.9%),燃油在 $R \approx 14$ mm 至 $R \approx 17$ mm 区间的分布占比总和达 90%,与试验结果存在差别,从图 10 中也可看出,这是由于两路燃油在离开喷口之后液膜融合,因此呈现出单峰结构,且最大占比增大。Model A 中燃油径向分布峰值点(14 mm, 27.4%),峰值半径 $R \approx 14$ mm,较对比工况缩小了 2 mm。Model B 中峰值点为(10 mm, 36.1%),峰值半径较 Model A 缩小 4 mm,在 $R < 10$ mm 区域,分布占比增大到 20%,燃油在小半径区域分布集中。Model D 与 Model B 的径向分布基本一致。Model C 中无明显峰值,最大占比为 31%,半径为 7 mm,与 Model B 和 Model D 相比,虽然气液比更大,但气流速度降低,因此虽然最大占比的半径减小,但燃油分布更为均匀,锥角更大。综上,不同防积碳结构对燃油径向分布影响的计算结果与试验结果基本一致,即匹配防积碳结构后燃油径向分布的峰值半径减小,雾化锥角变小,半径 R 较小的中间区域燃油分布占比升高。

不同防积碳结构对燃油分布影响的计算结果同样与试验结果基本一致,其中试验结果显示 Model B 与 Model A 相比,峰值半径减小 4.5 mm,最大占比增大 5.5%,且 Model D 与 Model B 分布相近,Model C 则分布均匀,锥角与 Model A 相当,无明显峰值;计算结果显示 Model B 与 Model A 相比,峰值半径减小 4.0 mm,最大占比增大 8.7%,且 Model D 与 Model B 分布相近,Model C 分布均匀;从峰值点和径向分布曲线来看,喷嘴匹配不同防积碳结构时计算结果的相对变化与试验结果的相对变化基本一致。

4 结 论

本文针对喷嘴匹配防积碳结构,通过试验方法获取了不同防积碳结构对喷嘴锥角、径向分布和周向分布的影响,并通过仿真方法对试验结果进行解释分析,可以得到如下结论:

1) 燃油喷嘴匹配防积碳结构后,雾化锥角减小,Model A 和 Model C 使得锥角分别减小 8° 和 6° ,Model B 和 Model D 使得锥角分别减小 18° 和 17° ;燃油径向分布的峰值半径和燃油分布的边界半径都减小,半径 R 较小的中间区域燃油分布占比升高,且燃油分布在半径 R 较小的区域越集中,相应周向分布不均匀度越小。

2) 对不同防积碳结构喷嘴进行数值模拟计算,计算结果与试验结果吻合较好,锥角计算误差在 13% 以下,说明本文采用的计算方法可行,采用计算结果进行分析解释合理。

3) 根据数值计算结果,解释了防积碳结构气流对燃油喷雾锥角和分布的影响过程。同一工况下,喷雾锥角的大小主要与燃油喷口端面处中心孔气流速度有关,中心气流速度增大,使得燃油径向的速度减小,则锥角越小,径向分布更集中,不利于燃烧室性能;而周向分布主要与气液比有

关, 气液比越大, 下游气流对燃油粒子的作用力增强, 分布越均匀。

4) 增大防积碳气量的同时增加喷嘴端面小孔, 可以有效增加防积碳效果, 同时降低防积碳气对燃油分布的影响, 使燃油分布更均匀。

参考文献:

- [1] 林子震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 《航空发动机手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第9分册 主燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [3] BRANDAUER M, SCHULZ A, SWITTIG S. Mechanisms of coke formation in gas turbine combustion chambers[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1996, 118(2): 265-270.
- [4] CHRISTOPHER O. Formation mechanisms of combustion chamber deposits[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [5] 刘天池, 范育新, 吴伟秋, 等. 不同几何结构对燃油喷嘴热防护特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(8): 1628-1642. LIU Tianchi, FAN Yuxin, WU Weiqiu, et al. Influence of different geometric structures on thermal protection characteristics of fuel nozzle[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(8): 1628-1642. (in Chinese)
- [6] 刘子超, 赵云惠. 液雾及颗粒的激光测量原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1988.
- [7] DURST F, BRENN G, XU T H. A review of the development and characteristics of planar phase-doppler anemometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, 33(1): 315-323.
- [8] 陈溯敏, 姜磊, 王彤, 等. 旋流杯结构对燃油雾化粒径的影响[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(12): 2568-2577. CHEN Sumin, JIANG Lei, WANG Tong, et al. Effects of swirl cup structure on fuel atomization partial size of fuel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(12): 2568-2577. (in Chinese)
- [9] LIU X, QI Z, MA Q, et al. Limiting explosible concentration of hydrogen-oxygen-helium mixtures related to the practical operational case[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 29(1): 240-244.
- [10] 刘存喜. 多级旋流空气雾化喷嘴雾化特性及光学测试方法研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2012. LIU Cunxi. Investigations of spray characteristics and optical measuring methods for multi-swirl air-blast atomizer[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [11] 桂韬, 夏丽敏, 邱伟, 等. 旋流器型式对空气雾化喷嘴雾化特性影响规律[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(3): 465-477. GUI Tao, XIA Limin, QIU Wei, et al. Effects of swirl cup structure on fuel atomization partial size of fuel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(3): 465-477. (in Chinese)
- [12] 乔卿贝. 航空发动机组合式喷嘴高温高压雾化特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. QIAO Qingbei. Investigations of spray characteristics for combined air-atomizer of aircraft engine in high temperature and high pressure[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [13] MENARD T, TANGUY S, BERLEMONT A. Coupling level set/VOF/ghost fluid methods: validation and application to 3D simulation of the primary break-up of a liquid jet[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2007, 33(5): 510-524.
- [14] DESJARDINS O, MOUREAU V, PITSCH H. An accurate conservative level set/ghost fluid method for simulating turbulent atomization[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(18): 8395-8416.
- [15] SIAMAS G A, JIANG X, WROBEL L C. Numerical investigation of a perturbed swirling annular two-phase jet[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009, 30(3): 481-493.
- [16] 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.
- [17] 刘娟, 孙明波, 李清廉, 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, SUN Mingbo, LI Qinglian, 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)
- [18] ISHIMOTO J. Integrated simulation of the atomization process of a liquid jet through a cylindrical nozzle[J]. *Interdisciplinary Information Sciences*, 2007, 3(1): 7-16.
- [19] 宫冠吉. 低压大剪切混合流燃油雾化和油气空间分布特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018. GONG Guanji. Investigation on atomization and fuel-air spatial distribution characteristics in large gradient shear mixing flow with low pressure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [20] 张书铭. 燃油喷嘴气液两相雾化过程与特性的数值研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019. ZHANG Shuming. The numerical study on the performance of gas-liquid two-phase atomization of fuel injector[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)