

掺混燃油在离心喷嘴内的流动与雾化特性研究

于浩洋¹, 刘爱骥¹, 成胜军², 李恒文¹

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136;

2. 中国航空发动机集团 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 燃料性质的改变会导致雾化特性的变化, 针对乙醇掺混航空煤油在离心式压力雾化喷嘴内的流动与雾化特性开展了研究。通过耦合流体体积法 (VOF) 和离散相模型 (DPM), 研究了不同乙醇掺混体积分数下掺混燃油在离心式喷嘴中的内部流动和外部雾化过程。研究表明: 在压差不变时, 喷嘴内空气芯直径随着掺混燃油内乙醇体积分数的增加而增大; 而液膜厚度则与空气芯直径成反比, 随着乙醇体积分数的增加而减小。喷嘴出口的速度随着乙醇体积分数的增加而增大; 在油膜表面的波动及气动力的共同作用下, 油膜失稳形成液滴, 获得了不同比例下掺混燃油在喷雾外流场内的喷雾粒径分布特征, 随着掺混乙醇体积分数的增加, 液滴的平均直径逐渐减小。

关键词: 离心喷嘴; 掺混燃油; VOF-DPM 耦合; 内部流动; 外部雾化

中图分类号: V231.23

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rmdlge.2023.03.009

[引用本文格式] 于浩洋, 刘爱骥, 成胜军, 等. 掺混燃油在离心喷嘴内的流动与雾化特性研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(3): 66-73. YU Hao-yang, LIU Ai-guo, CHENG Sheng-jun, et al. Flow and atomization characteristics of blended fuel in a centrifugal nozzle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3): 66-73.

Flow and Atomization Characteristics of Blended Fuel in a Centrifugal Nozzle

YU Hao-yang¹, LIU Ai-guo¹, CHENG Sheng-jun², LI Heng-wen¹

(1. School of Aeroengine, Shenyang Aerospace University, Shenyang, China, Post Code: 110136;

2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou, China, Post Code: 412002)

Abstract: Changes in fuel properties will lead to changes of atomization characteristics. The flow and atomization characteristics of ethanol mixed with aviation kerosene in centrifugal pressure atomization nozzles were studied. Through the coupled volume-of-fluid (VOF) and discrete phase model (DPM), the internal flow and external atomization processes of blended fuel in a centrifugal nozzle under different ethanol blending volume fractions were studied. The research results show that when the pressure difference is constant, the diameter of the air core in the nozzle increases with the increase of the ethanol volume fraction in the blended fuel, while the thickness of the liquid film is inversely proportional to the diameter of the air core, and it decreases with the increase of the ethanol volume fraction. The velocity of the nozzle outlet increases with the increase of ethanol volume fraction; the droplets are formed due to oil film instability under the influence of the fluctuation of the oil film surface and the aerodynamic force; the distribution characteristic of droplet diameter of fuel with different blending ratios in the outer atomization flow field is obtained. As the volume fraction of blended ethanol increases, the average diameter of droplets gradually decreases.

Key words: centrifugal nozzle, blended fuel, VOF-DPM coupling, internal flow, external atomization

收稿日期: 2022-03-05; 修订日期: 2022-03-28

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20180550358, 2019-ZD-0226)

Fund-supported Project: Liaoning Provincial Natural Science Foundation of China(20180550358, 2019-ZD-0226)

作者简介: 于浩洋(1997-), 男, 沈阳航空航天大学硕士研究生。

通讯作者: 刘爱骥(1979-), 男, 沈阳航空航天大学教授。

引言

乙醇为一种生物基液体燃料,与石油基燃料有很多相似之处,在地面内燃机上已得到了广泛应用^[1],有希望成为航空煤油的替代燃料,国外已经开展了相关的雾化及燃烧特性研究。

在航空发动机燃烧过程中,需要首先通过燃油喷嘴将液体燃料雾化,增大燃料与空气的接触面积,降低燃料的反应时间^[2]。因此,液体燃料的雾化特性对于航空发动机的燃烧过程至关重要。数值模拟逐渐成为喷嘴流动与雾化特性研究的一个重要手段。邱贵霞等人^[3]用VOF方法对离心喷嘴进行了仿真分析,分析了各参数对雾化性能指标影响的显著性,并利用回归分析得到规律曲线获得最佳参数组合。赵秀婷等人^[4]为提高航空发动机喷嘴喷雾性能,利用多相流技术和雷诺应力湍流模型,对离心式喷嘴的副油路进行数值模拟,并将出口流量模拟结果与实验数据进行对比,两者结果吻合良好。Ibrahim等人^[5]对压力旋流雾化器中的两相流进行了计算模拟,提出了耦合内流模拟和非线性片层破碎模型,确定了压力旋流雾化器流出的液体片层的破碎长度。Zhao等人^[6]在DPM模型中模拟了压力旋流喷射器的雾化特性,预测和计算了不同喷射器的雾化特性。Nazeer等人^[7]研究了Y型喷嘴的雾化,预测了气液界面的初始发展和破碎部分。Yu等人^[8]研究了旋压式降尘喷嘴的雾化特性,提出了一种多尺度方法,区分了内部流场、一次雾化和二次雾化,引入自适应网格细化方法预测液芯破裂。

目前,虽然国内外对航空煤油在离心式喷嘴内的流动与雾化特性研究较多,但针对航空替代燃料和部分航空替代燃料,如掺混航空煤油,在离心式喷嘴内的流动与雾化特性影响的研究较少。Ishak等人^[9]采用DPM模型研究了4种生物燃料在喷油器内的喷雾特性,分析了各种生物燃料及混合燃料的喷雾特性,通过数值分析研究了不同生物燃料混合物的喷雾特性。Sivakumar等人^[10]对比了麻风树油与常规航空煤油(JetA-1)相关的喷雾特性,得到了燃料的排放行为、喷雾锥角、液体燃料片的破裂和液滴尺寸分布。张涛等人^[11]研究了航空煤油和乙醇

不同混合体积分数对离心喷嘴全局雾化特性的影响规律,但未开展乙醇体积分数对于混合燃油雾化液滴二次破碎的影响。

本文基于Fluent 19.2操作平台,采用VOF模型与DPM模型相结合的方法,对航空煤油/生物基乙醇掺混燃料的雾化性能进行了数值模拟计算。研究了不同掺混比下的掺混燃料在离心喷嘴内的流动特性以及在外部流场中的雾化特性。有效解决了单独采用VOF计算无法统计破碎液滴粒度问题和单独采用DPM不能根据实际喷嘴形状进行计算的问题,有效地将一次雾化与二次雾化联合在一起。

1 掺混燃油的物性参数

向航空煤油中掺混不同比例的乙醇,乙醇满足国标GB6820-92,纯度达到99.2%。采用高纯度乙醇可以防止乙醇和航空煤油混合时发生相分离。KOE100代表航空煤油体积分数0%,乙醇体积分数100%。其物性参数如表1所示^[12]。

表1 乙醇的物理性质

Tab. 1 Physical properties of ethanol

燃料名称	动力粘度 μ / $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	表面张力 σ / $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	密度 ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
KOE100	0.000 7	0.023	789

选取4种体积比不同的掺混燃油。采用相同的计算模型和边界条件,从而得出燃料特性的变化对喷嘴内流动及雾化的影响。模拟计算时掺混燃油作为同一相处理,混合燃油的动力粘度、表面张力和密度分别用黏度计、全自动表面界面张力仪和密度计进行测量,4种掺混燃料的物理性质如表2所示。其中K100E0代表航空煤油体积分数100%,乙醇体积分数0%。

表2 不同比例的掺混燃油的物理性质

Tab. 2 Physical properties of fuels with different blending ratios

燃料名称	$\mu / \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	$\sigma / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
K100E0	0.001 84	0.026 0	802.0
K95E5	0.001 78	0.025 8	801.5
K85E15	0.001 64	0.025 4	798.5
K70E30	0.001 49	0.025 0	792.1

2 计算方法及模型的建立

2.1 数值计算方法和边界条件

采用 Fluent 软件模拟离心喷嘴内部流场特性。湍流模型采用 Realizable $k - \epsilon$ 模型。采用 VOF 和 DPM 耦合的方法,求解器选择压力基、显式和非定常流。掺混燃油计算时作为同一液相处理,只考虑物性参数对雾化效果的影响,空气物性参数从软件内部调用即可。空气定义为第一相,掺混煤油定义为第二相。喷嘴在低压力下液膜的初次破碎主要是由开尔文-亥姆霍兹(K-H)产生沿周向分布的环形液带导致,在高压力时液膜的破碎是由瑞利-泰勒(R-T)不稳定性引发的周向扰动波导致。所以二次破碎模型采用 KH-RT 模型^[12]。

出口边界条件选取压力入口和压力出口。水力直径设置为孔径,进口湍流强度根据公式 $I = 0.16Re^{-0.125}$ 计算得到。壁面设置为无滑移壁面,压力和速度耦合方式采用 PISO,压力差值采用 Body Force Weighted,其余差值使用二阶迎风格式离散。时间步长采用可变的时间步长,初始时间步长为 1×10^{-6} 。库朗数(Courant number)设置为 1,模拟计算时当库朗数超过 1 时,对应的的时间步长则会降低。确保满足 CFL 准则,保证计算的稳定性。喷嘴进口为压力进口。对于燃油在喷嘴内流动及雾化性能的影响,除了燃料本身的性质外,燃油的压力、温度及喷入环境都有影响,本研究重点为燃料的变化。因此,外界环境设为常温常压,供油压差为 0.2 MPa,燃油温度为 20 °C。

2.2 物理模型及网格划分

选用某航空发动机上应用成熟的双路离心喷嘴作为研究对象,建立的喷嘴模型如图 1 所示。其中,喷嘴计算域包括直径 2.5 mm 前腔流道、旋流槽、旋流室以及直径 40 mm、高 25 mm 的喷雾场,前腔流道轴向长度约为 9.5 mm;双路离心式喷嘴副油路有 3 个旋流槽,旋流槽深 0.51 mm,槽宽 0.8 mm。

为选择合适的计算网格数,在保证计算精度的同时又能保证计算速度,选用了 284 万和 332 万两种不同密度的网格进行无关性检验。图 2 为采用不同网格数量时,喷嘴轴线上的速度变化。可以看出 284 万与 332 万的网格速度曲线一致性较好,能够

捕捉到喷嘴内的速度突变现象,因此选用 284 万的网格数量进行仿真计算。

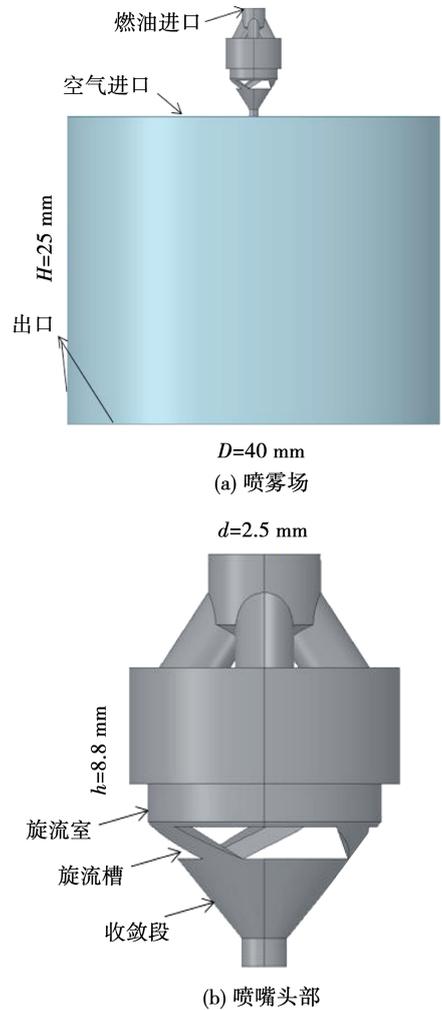


图 1 喷嘴模型

Fig. 1 Nozzle model

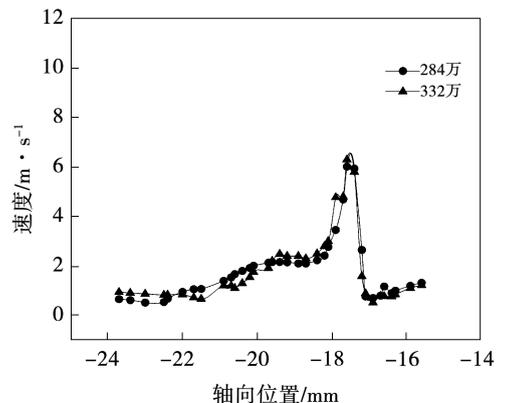


图 2 不同数量网格的轴向位置速度对比

Fig. 2 Speed comparison of axial position of different numbers of grids

对计算区域整体网格划分如图3所示。在复杂形状结构处与近壁面采用了多面体网格,中心区域则采用正六面体的结构化网格,在网格自适应时需采取 puma 网格自适应加密方法。网格自适应结果如图4所示。

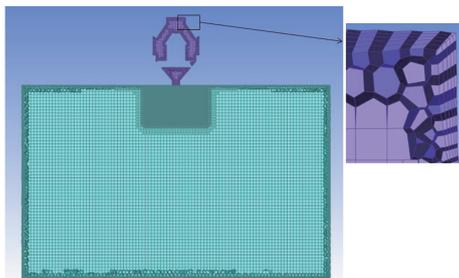


图3 喷嘴流体域计算网格

Fig. 3 Computational grid of nozzle fluid domain

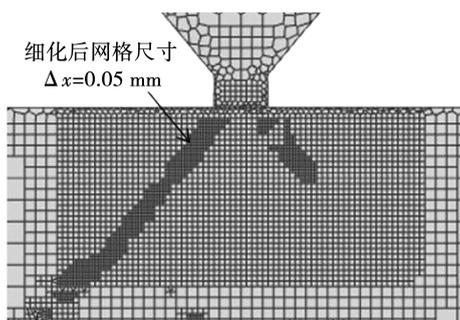


图4 网格自适应

Fig. 4 Grid adaptive encryption

3 计算结果及分析

3.1 喷嘴内部流动

图5为不同时间喷嘴内液相分布,在使用不同燃料时,喷嘴内的流动情况相同,因此只列出了1种燃料(K100E0)时的流动特性。在0.8 ms时燃油经喷嘴入口进入旋流室内,并沿着旋流室内壁做贴壁运动。在1 ms时燃油流经旋流槽进入收敛段,此时旋流室内还存在一定的空气区。3和4 ms时燃油紧贴收敛段,喷嘴内部的气液交界区呈现振荡形式。6.3 ms时喷嘴内中心的空气芯逐渐压缩,波动程度减小,液膜开始流入出口段,在液体从喷嘴流出后,内部的空气芯直径逐渐减小。7~12 ms时,喷嘴旋流室内部的空气区域逐渐缩小,随后喷嘴的雾化状态达到稳态。

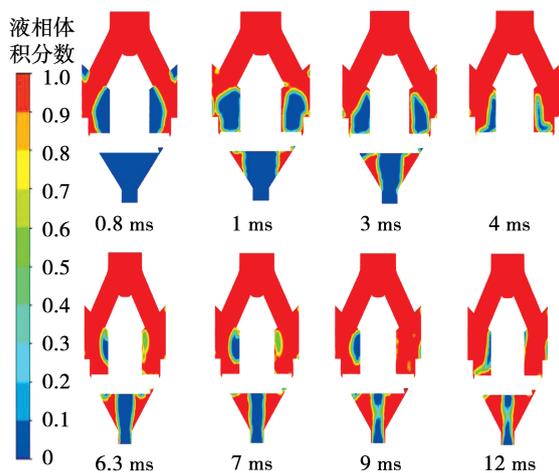


图5 不同时间喷嘴内液相分布

Fig. 5 Liquid phase distribution inside the nozzle at different times

图6为燃油在流经喷嘴出口后,不同时刻出口处的液相分布。燃油在旋流室中高速旋转流动,使离心喷嘴沿轴线附近区域产生负压,液体燃油旋转产生了卷吸作用,导致离心喷嘴出口处吸入外部流域中的空气从而在喷嘴的出口段形成了空气锥,造成了空气芯和液膜厚度的出现。定义出口壁面与空气锥之间液体燃油的厚度为液膜厚度。

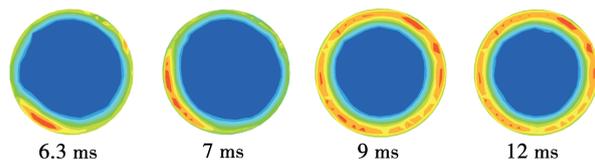


图6 不同时间喷嘴出口液相分布

Fig. 6 Liquid phase distribution at the nozzle outlet at different times

3.2 空气芯直径

当喷嘴内的液膜厚度增长到一定程度时,中心的空气芯逐渐压缩,波动程度减小,液膜开始流入出口段。在液体从喷嘴流出后,内部的空气芯直径逐渐减小。随后喷嘴的雾化状态达到稳态,喷嘴内液膜表面波动减弱。

图7为燃油K100E0在不同时刻喷嘴出口处的空气芯直径大小,图中浅色区域为空气区域,将液相体积分数小于0.3的区域定义为空气芯区^[13]。可以看出,在6.3~7 ms时,喷嘴内部的空气芯开始逐渐减小,空气芯由最开始的不规则圆形,逐渐发展为近似圆形,空气芯中心逐渐位于喷嘴出口的圆心。

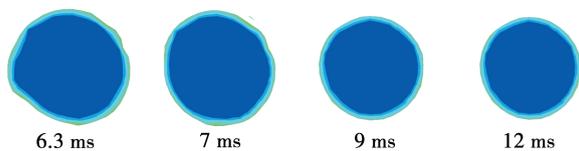


图7 不同时刻喷嘴出口处空气芯大小

Fig.7 The size of air core at the nozzle outlet at different times

图8为喷嘴雾化稳定后,4种掺混燃料空气芯直径变化趋势。结合图7可以看出,当9 ms时内部空气芯趋于圆形,而后空气芯直径呈现波动。造成内部空气芯波动的主要原因是内部空气涡对相界面的影响,且随着乙醇掺混体积分数的增加,空气芯直径增大。其中,K100E0的空气芯直径约为0.747 mm,K70E30的空气芯直径约为0.786 mm,这是由于乙醇掺混比例增大使燃油粘度减小,在相同压差下,燃油在喷嘴出口的附着减小,导致空气芯直径增大。

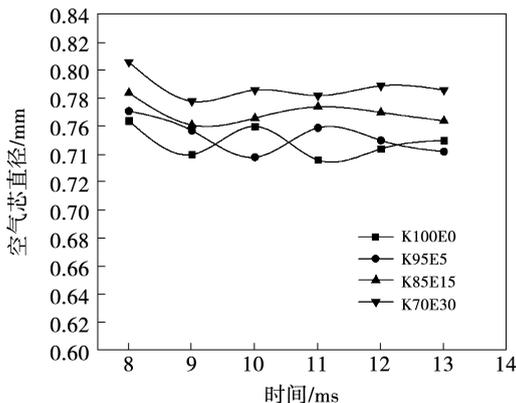


图8 不同比例的掺混燃油喷嘴出口空气芯直径随时间变化

Fig.8 Variation of air core diameter at the nozzle outlet of fuel with different blending ratios with time

3.3 喷嘴出口液膜厚度

图9为不同时刻燃油K100E0喷嘴出口液膜厚度云图。由于喷嘴内部流动存在扰动,喷嘴出口处的气液相界面围成的图形非圆形,为求解得出液膜的当量厚度 t_c 。利用CFD-Post求解出汽相区域面积 S ,得到汽相区域当量半径 r ,液膜的当量厚度 t_c 为:

$$t_c = d_0/2 - r \quad (1)$$

式中: d_0 —喷嘴出口直径,mm; r —汽相区域的当量半径,mm; t_c —液膜的当量厚度,mm。

图10为喷嘴雾化稳定后液膜厚度的变化趋势。可以看出,液膜厚度随乙醇体积分数的增加而减小。这是由于乙醇体积分数的增大,导致燃油粘性降低,在相同压差下,粘性低的液体旋流强度较大,有更多的燃油在空气的作用力下破碎成为细小的液滴,液膜厚度减小。

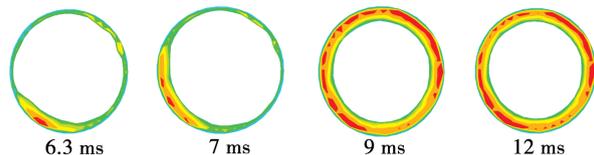


图9 不同时刻喷嘴出口液膜厚度

Fig.9 The thickness of liquid film at the nozzle outlet at different times

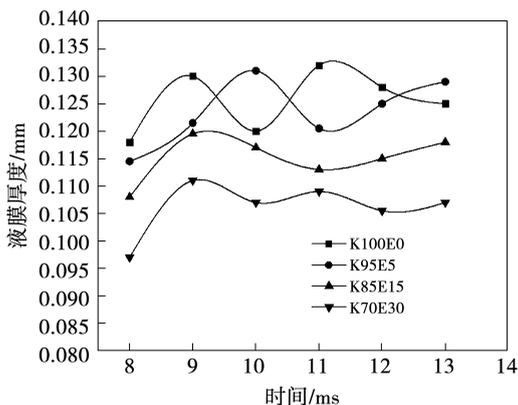


图10 不同比例的掺混燃油喷嘴出口液膜厚度随时间变化

Fig.10 Variation of liquid film thickness at the nozzle outlet of fuel with different blending ratios with time

3.4 喷嘴出口速度

图11为距离喷嘴出口下游0.5 mm处截面速度沿径向上的分布情况。在喷嘴出口下方轴向位置 $y = -18$ mm径向上的燃油速度为 $K100E0 < K95E5 < K85E15 < K70E30$ 。因为在相同压差下,混合燃油中乙醇粘度比航空煤油低,混合燃油和离心喷嘴壁面摩擦力相对较小,导致乙醇体积分数的混合燃油液滴在径向上动量更大。故航空煤油中混入乙醇后,会使液体燃油的速度变大。在喷嘴出口下方轴向位置 $y = -18$ mm径向上K100E0,K95E10,K85E15和K70E30掺混燃油的最大速度分别为7.45,7.5,7.7和8.15 m/s,最大速度提高了9.4%。结果表明,随着乙醇体积分数的增加,喷嘴出口的速度

度逐渐增大,这是由于乙醇粘度比航空煤油低,粘性较小,导致摩擦损失较小。故燃油粘度越小,能量损失越小,速度越大。航空煤油中混入乙醇,有利于增大燃油的在喷嘴中的速度。

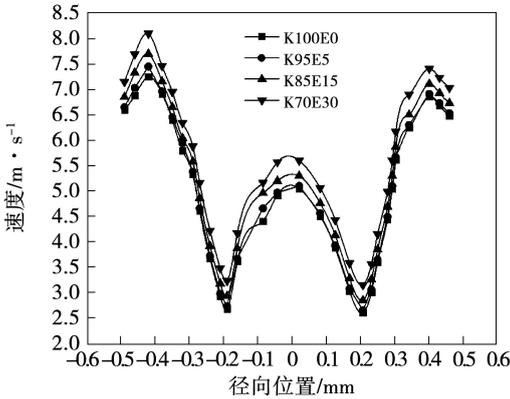


图 11 不同比例的掺混燃油径向速度分布
Fig. 11 Radial velocity distribution of aviation kerosene with different blending ratios

3.5 二次雾化

图 12 为 K100E0 掺混燃料在不同时刻的雾化形态图。图 13 为数值模拟结果与高速摄影机拍摄喷嘴出口雾化效果的对比。由图 13 可知,喷嘴出口有明显的连续液膜区和清晰的液膜、液滴分界面。通过对液膜破碎距离的对比,可以看出计算结果能反映出喷嘴雾化的变化过程,验证了数值模拟的准确性。

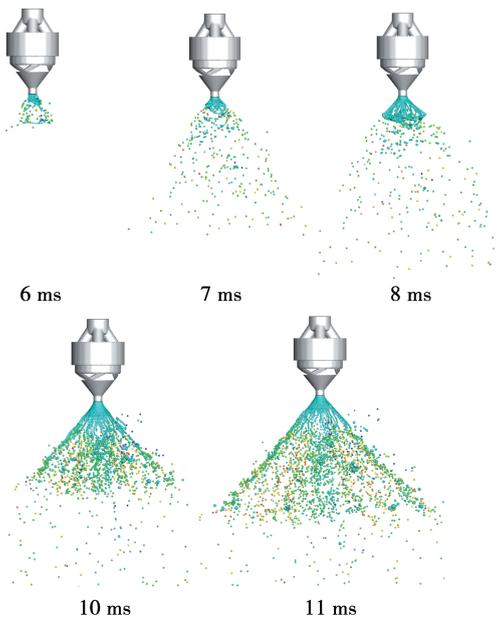


图 12 雾化形态图

Fig. 12 Atomization shape diagram

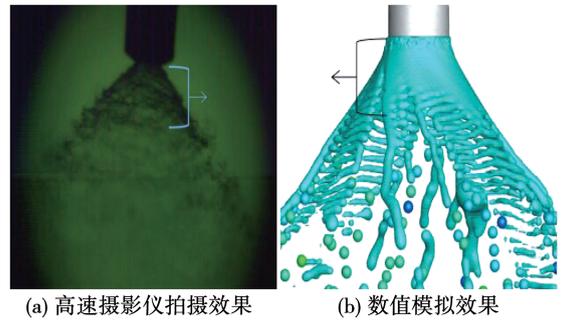


图 13 数值模拟结果与高速摄影机拍摄的效果对比
Fig. 13 Comparison between numerical simulation and high-speed camera shooting

表 3 为掺混燃油在 0.2 MPa 时锥角大小对比。可以看出,随着乙醇体积分数的增大,喷嘴的锥角值逐渐增大,而最大液滴直径却在减小,说明随着表面张力和粘度的减小,燃料的雾化效果更好。

表 3 0.2 MPa 掺混航空煤油锥角

Tab. 3 0.2 MPa blended aviation kerosene cone angle

K100E0	K95E5	K85E15	K70E30
78.96°	80.97°	81.85°	84.06°

图 14 为喷油压力对锥角的影响。实验测试的是不掺混乙醇的航空煤油在不同喷油压力下的锥角值。可以看出,实验值与模拟值的曲线趋势较为符合,进一步验证了模拟的准确性。从图中可以看出雾化锥角随着喷油压力的增大呈现增大趋势,尤其是从低压 0.2 MPa 升至 0.6 MPa 时。这是由于喷注压力增大,液体动能增加,燃油和气体相互间作用力增强,而超过 0.8 MPa 后,压力对喷雾锥角的影响趋势会减缓。

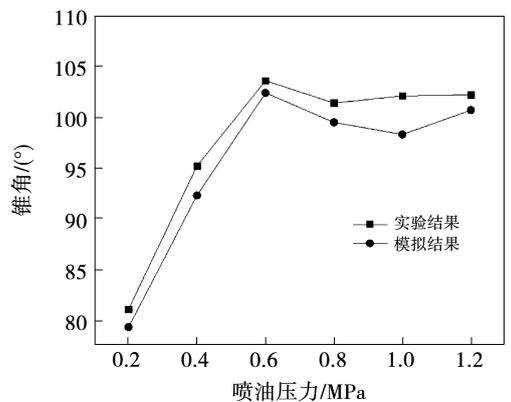


图 14 喷油压力对锥角的影响

Fig. 14 Effect of injection pressure on cone angle

在喷嘴出口下方 5 mm 处创建一个平面,监测通过该平面的粒子数,并得出粒径大小分布情况。分别对 4 种燃料进行粒径信息统计,结果如图 15 所示。由图 15 可知,在相同压差下,K100E0 和 K95E5 燃料在喷嘴出口处的粒径分布主要集中在 150 ~ 250 μm 之间,平均粒径分别为 219.5 和 200.5 μm ;而对于 K85E15 和 K70E30 燃料的粒径主要分布在 100 ~ 200 μm ,平均粒径分别为 180.5 和 170.5 μm ,且随乙醇掺混比的增加,其对应的粒径分布逐渐向左移动,表明随着粘度和密度的降低,对应燃料破碎雾化后的颗粒直径越来越小。喷雾场内液滴粒径分布更为均匀,对应的雾化质量更好,更有利于后续的燃烧。

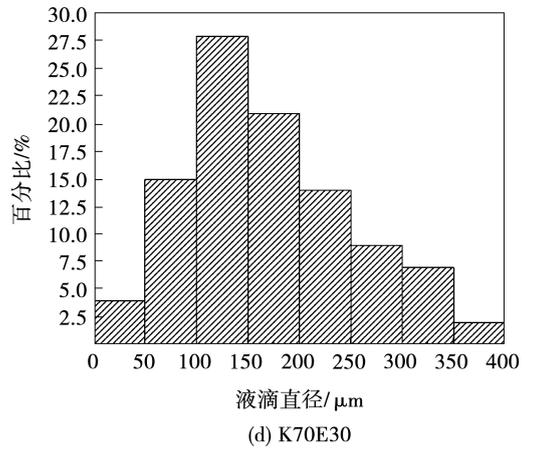
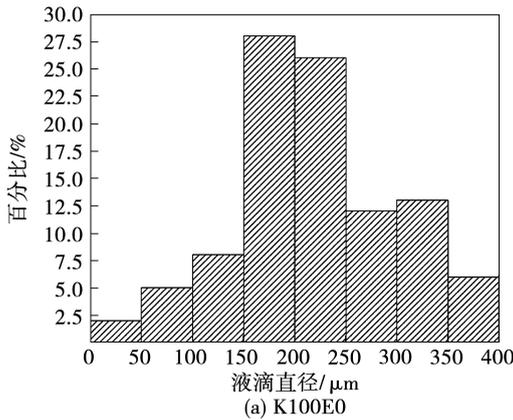
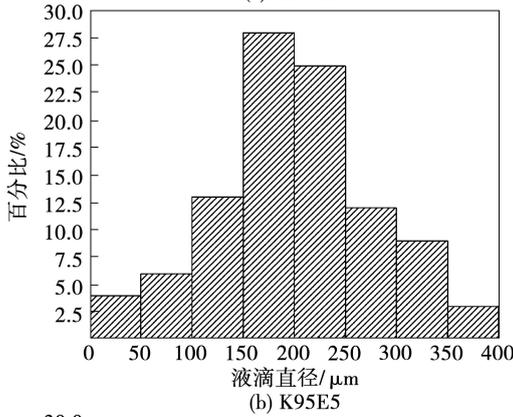


图 15 液滴直径分布统计

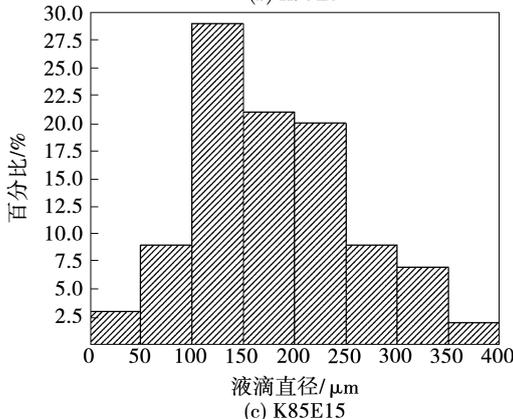
Fig. 15 Droplet diameter distribution statistics



(a) K100E0



(b) K95E5



(c) K85E15

4 结 论

(1) 随着掺混航空煤油乙醇体积分数的增加,燃油表面张力和粘度逐渐减小,喷嘴内的旋流强度逐渐增大。导致喷嘴出口处的空气芯直径增大,液膜厚度减小。

(2) 随着掺混航空煤油乙醇体积分数的增加,燃油在喷嘴内的流动损失减小,导致燃油流经喷嘴的最大速度变大。在距离喷嘴出口 0.5 mm 处的截面上,K70E30 掺混燃油最大速度相比纯航空煤油提高了 9.4%。

(3) 得到了掺混燃料不同时刻的雾化过程并在稳态时与高速摄影仪所拍摄的实际喷嘴雾化形态做了对比。细致地展示出液膜破碎的特征,得到了雾化锥角随着乙醇体积分数的增加逐渐增大。

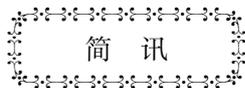
(4) 计算得到了不同掺混航空煤油液滴粒径的空间分布特征,结果表明,随着乙醇体积分数的增大,液滴的平均直径逐渐减小,粒径的分布也更加均匀,雾化质量更好。

参考文献:

[1] 唐琦军,蒋 蕻,刘敬平,等. 丙酮-丁醇-乙醇/汽油混合燃料对高速发动机性能影响的试验研究[J]. 内燃机工程,2021, 42(3):33-40.
TANG Qi-jun, JIANG Ping, LIU Jing-ping, et al. Experimental study on the effects of acetone-butanol-ethanol/gasoline blends on the performance of a high-speed engine[J]. Chinese Internal Com-

- bustion Engine Engineering, 2021, 42(3):33-40.
- [2] 吴恩启,顾自明,赵兵,等.空气雾化喷嘴的设计与实验研究[J].热能动力工程,2018,33(4):69-75.
WU En-qi, GU Zi-ming, ZHAO Bing, et al. Design and experimental research of air atomizing nozzle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(4):69-75.
- [3] 邱贵霞,侯力,易宗礼,等.离心喷嘴出口结构参数对雾化性能的影响分析[J].推进技术,2020,41(12):2782-2789.
QIU Gui-xia, HOU Li, YI Zong-li, et al. Effects of structure parameters of centrifugal nozzle on atomization performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(12):2782-2789.
- [4] 赵秀婷,卢燕,高兴勇.离心式喷嘴喷雾数值仿真研究[J].热能动力工程,2020,35(7):65-70.
ZHAO Xiu-ting, LU Yan, Gao Xing-yong. Numerical simulation of centrifugal nozzle spray[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7):65-70.
- [5] IBRAHIM A A, JOG M 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(4):945-953.
- [6] ZHAO J. Simulation and experimental study on the atomization character of the pressure-swirl nozzle[J]. Open Journal of Fluid Dynamics, 2012, 2(4):271-277.
- [7] NAZEER Y H, EHMANN M, SAMI M, et al. Atomization mechanism of internally mixing twin-fluid Y-jet atomizer[J]. Journal of Energy Engineering, 2021, 147(1):04020075.
- [8] YU Hai-ming, JIN Yee-chung, CHENG Wei-min, et al. Multiscale simulation of atomization process and droplet particles diffusion of pressure-swirl nozzle[J]. Powder Technology, 2021, 379:127-143.
- [9] ISHAK M, ISMAIL F, MAT S C, et al. Numerical study on the influence of nozzle spray shape on spray characteristics using diesel and biofuel blends[J]. Biofuels, 2021, 12(9):1109-1121.
- [10] SIVAKUMAR D, VANKESWARAM S, SAKTHIKUMAR R, et al. An experimental study on jatropa-derived alternative aviation fuel sprays from simplex swirl atomizer[J]. Fuel, 2016, 179:36-44.
- [11] 张涛.航空煤油/乙醇混合燃油旋转锥形液膜雾化特性研究[D].大连:大连理工大学,2019.
ZHANG Tao. Study on the atomization characteristics of jet kerosene/ethanol mixed fuel rotating cone liquid film[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [12] 王雷,方斌,王光彩.基于大涡模拟的离心式喷嘴雾化过程研究[J].推进技术,2021,42(8):1855-1864.
WANG Lei, FANG Bin, Guang-cai. Process of pressure swirl nozzle atomization based on large eddy simulation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(8):1855-1864.
- [13] 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 Yong-liang. Experiment and numerical studies on the atomization of a pressure atomizer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2013.

(姜雪梅 编辑)



瑞士 Axpo 和 Rhienergie 公司共建水电站制氢工厂

据官网报道,瑞士可再生能源公司 Axpo 和 Rhienergie 共同投资 800 万瑞士法郎(870 万美元),于 2023 年 1 月 23 日开始在瑞士 Domat/Ems 的 18 MW Reichenau 水电站建造 2.5 MW 制氢工厂。该设施计划于 2023 年秋季投入运行,使用水力发电,年生产约 350 吨绿色氢气,将使柴油的使用减少约 150 万升。绿色氢气将从生产设施直接输送到加油站。

瑞士正努力在 2050 年前实现碳中和。为了实现这一目标,必须大力减少二氧化碳排放。绿色氢作为一种气候友好型燃料,在这一脱碳战略中发挥着关键作用,特别是在货运领域。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)