

文章编号: 1000-8055(2023)05-1058-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220904

RP-5 和 RP-3 燃油对离心喷嘴雾化特性影响分析

于小兵¹, 陈思¹, 何小民², 陆荣², 邹玉翠¹, 朱诚¹

(1. 中国航发贵阳发动机设计研究所 燃烧研究部, 贵阳 550081;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为探究 RP-5 和 RP-3 燃油对双油路离心喷嘴雾化性能的影响, 开展不同供油压力下两种燃油对双油路离心喷嘴的质量流量特性、雾化锥角、索太尔平均直径(SMD)及油滴速度等性能影响的研究, 结果表明: 在各供油压力下, RP-5 燃油的喷嘴质量流量大于 RP-3 燃油, 主油路质量流量相差约为 5%, 副油路质量流量相差约为 2%; RP-5 和 RP-3 燃油的喷嘴雾化锥角大小基本一致; 当副油路供油质量流量小于 8 kg/h 时, RP-5 燃油的 SMD 大于 RP-3 燃油, 当副油路供油质量流量大于 8 kg/h 时, RP-5 和 RP-3 燃油的 SMD 基本一致; 主、副油路同时供油时, 随着质量流量不断增加, RP-5 燃油的 SMD 大于 RP-3 燃油且差值不断增大; 随着供油压力升高, RP-5 燃油的油滴速度要显著高于 RP-3 燃油, 且都呈现出“M”形分布。

关 键 词: RP-5 燃油; RP-3 燃油; 雾化特性; 索太尔平均直径; 双油路离心喷嘴

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Effects analysis of RP-3 and RP-5 fuels on atomization characteristics of pressure-swirl atomizer

YU Xiaobing¹, CHEN Si¹, HE Xiaomin², LU Rong², ZOU Yucui¹, ZHU Cheng¹

(1. Combustion Research Department, Guiyang Engine Design Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Guiyang 550081, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to explore the effects of RP-5 and RP-3 fuels on the atomization performance of dual-orifice pressure-swirl atomizer, the research on the effects of properties such as flow rate characteristics, cone angle, Sauter mean diameter (SMD) and droplet velocity was carried out for the two kinds of fuels under different fuel supply pressures. The results showed that the flow rate of the RP-5 fuel nozzle was larger than that of the RP-3 fuel. The main fuel line flow differed by about 5%, and the primary fuel line flow differed by about 2%. The nozzle atomization cone angles of RP-5 and RP-3 fuels were basically the same. When the primary fuel supply flow rate was less than 8 kg/h, the SMD of RP-5 fuel was greater than that of RP-3 fuel. When the flow rate was greater than 8 kg/h, the SMD of RP-5 and RP-3 fuels were basically the same. With the continuous increase of the main and primary fuel flows, the SMD of RP-5 fuel was larger than that of RP-3 fuel and the difference continued to increase. With the increase of fuel supply pressure, the droplet velocity of RP-5 fuel was significantly higher than that of RP-3 fuel, all showing an “M”-shaped distribution.

Keywords: RP-5 fuel; RP-3 fuel; atomization characteristics; Sauter mean diameter; dual-orifice pressure-swirl atomizer

收稿日期: 2022-11-24

作者简介: 于小兵(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事主燃烧室设计。E-mail: 626462541@qq.com

引用格式: 于小兵, 陈思, 何小民, 等. RP-5 和 RP-3 燃油对离心喷嘴雾化特性影响分析[J]. 航空动力学报, 2023, 38(5): 1058-1066. YU Xiaobing, CHEN Si, HE Xiaomin, et al. Effects analysis of RP-3 and RP-5 fuels on atomization characteristics of pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(5): 1058-1066.

RP-3 燃油是我国航空领域常用的燃料,但在海洋环境下,舰载飞机静电不容易释放,静电积累量较大,在空中加油过程中发生静电点火爆炸的可能性较高。而 RP-5 燃油与 RP-3 燃油热值相近,且闪点更高、密度更大,可降低舰载飞机静电点火爆炸的可能性,相同容积的油箱可以携带更多的燃油,提高其安全性和续航性,因此在海洋环境下较多采用 RP-5 燃油^[1]。

但 RP-5 和 RP-3 燃油在燃烧热值、运动黏度、饱和蒸汽压、热氧化安定性、积碳和抗磨性等方面都有差异,其对燃烧室点火、冒烟积碳,燃烧效率,污染排放,出口温度场等性能产生的影响尚不明确^[2],限制了 RP-5 燃油的使用。

而燃油喷嘴的雾化质量与燃烧室性能息息相关,雾化生成的油滴直径越大,完全燃烧耗时越久,所需空间越大,容易造成不完全燃烧以及冒烟数增加。低供油压力下的喷嘴雾化油滴直径大小对于点火性能有着显著的影响。雾化分布不均匀则容易导致出口温度场不均匀,雾化锥角过大,燃油容易喷射到壁面,导致壁面烧蚀和燃烧不充分,从而降低燃烧效率^[3]。

王良等^[4]采用 RP-5 和 RP-3 燃油,开展了全环燃烧室低温点火试验研究,发现常温下燃烧室点火性能基本一致,但在 -40°C 低温环境下 RP-3 燃油燃烧室点火成功,而 RP-5 燃油点火失败,RP-5 燃油的燃烧室点火边界比 RP-3 燃油窄 20% 左右,由此得出了 RP-5 较 RP-3 燃油的燃烧室点火边界窄和着火时间长的结论。

祁斌等^[5]开展了涡轴发动机的起动试验,发现高温下采用 RP-3 和 RP-5 燃油发动机起动性能相当,而在低温下,则差别较大。RP-3 燃油能在 -40°C 环境下成功起动,而采用 RP-5 燃油,只能在 -20°C 环境下成功起动。

任伟等^[6]定性分析了 RP-3 和 RP-5 燃油密度、运动黏度等燃油物性对飞机动力系统性能的影响,发现燃油密度差异影响了飞机的重心、推力和续航,燃油运动黏度差异影响了燃油流动阻力。而 RP-5 的高闪点特性可以降低闪燃的可能性。

在混合燃料物性差异方面,文献 [7-9] 根据常用航空燃料的物性,调配出多种混合替代燃料,并对其进行对比验证。张涛^[10]分别采用航空燃油与乙醇不同混合比例的离心喷嘴的雾化性能,发现小压力下航空燃油中乙醇浓度增加能提高雾化特性,如雾化油滴速度增大、破碎长度减小和油滴粒径变细。供油压力超过 0.8 MPa,乙醇浓度

对于混合燃油的雾化特性影响变小。刘靖等^[11]分析了 RP-3 航空燃油与其模型燃料的雾化特性对比,发现 RP-3 航空燃油的模型燃料雾化锥角更大, SMD 更小,油滴速度也略高于 RP-3 航空燃油,但差距很小,有较高的相似性。王成军、徐丽等^[12-14]通过研究柴油与 RP-3 燃油的雾化特性及点火特性,对比发现,燃油运动黏度、密度对雾化影响较大,两种燃油的雾化锥角基本相同,常温下更换柴油后点火性能依旧良好。刘爱斌、王家俊等^[15-16]通过改变 RP-3 燃油温度的方式了解不同燃油温度对离心喷嘴雾化特性的影响,都得出了温度升高,燃油黏性下降,雾化质量变好的结论。

通过上述研究发现,燃油的物性参数对喷嘴雾化特性及燃烧室性能有着较大影响。国内外学者对 RP-3 燃油替代燃料的雾化特性及 RP-5 和 RP-3 燃油的燃烧特性进行了广泛的试验对比验证,但并未系统深入开展 RP-5 和 RP-3 燃油双油路离心喷嘴雾化特性研究。为此,本文通过构建雾化试验系统,开展不同供油压力下 RP-5 和 RP-3 燃油对双油路离心喷嘴的质量流量(下文简称流量)特性、雾化锥角、索太尔平均直径(SMD)及油滴速度等性能的影响研究,分析雾化性能影响因素,掌握喷嘴雾化特性变化规律,为在海洋环境需要由 RP-3 燃油更换为 RP-5 燃油的情况提供数据支持。

1 试验系统、方法及工况

为获得不同燃油的雾化特性,构建了激光燃油测试系统,如图 1 所示。试验系统由双油路离心喷嘴、供油系统、马尔文激光粒度仪、粒子图像测速仪和工业照相机等组成。

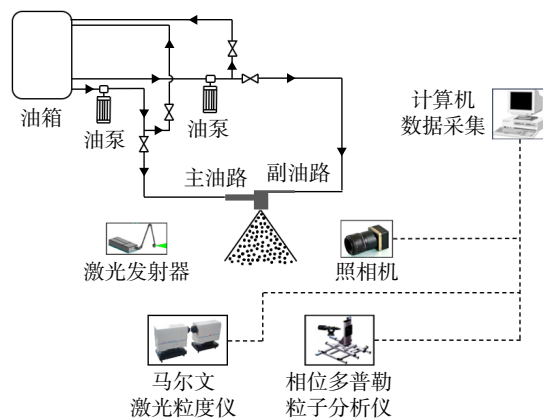


图 1 燃油雾化试验系统图

Fig. 1 Diagram of fuel atomization test system

试验采用双油路离心喷嘴,结构如图2所示。由切向槽、旋流室和喷口等结构组成。燃油经过油滤后,流入切向槽中,将燃油供油压力转化为动能,使燃油在旋流室中做切向运动,在喷口处旋转形成液膜环,喷出喷口后受气动力、表面张力以及惯性力的影响,油膜破碎成更容易燃烧的油滴。

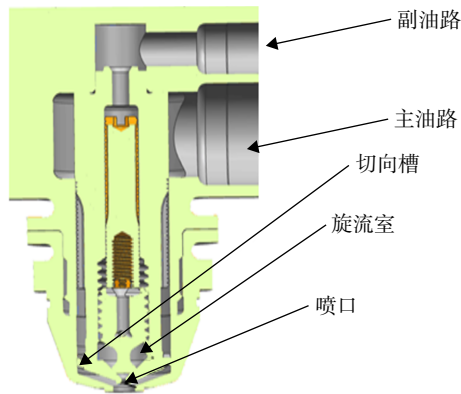


图2 某型航空发动机离心式雾化喷嘴

Fig. 2 Dual-orifice pressure-swirl atomizer for an aeroengine

燃油物性中对雾化特性影响较大的有燃油密度、运动黏度和表面张力,本次试验所采用的 RP-3 燃油与 RP-5 燃油采购符合标准 GB 6537-2006 和 GJB 560A-97,相关物性参数如表1所示。

表1 RP-3 燃油与 RP-5 燃油的物性参数

Table 1 Physical parameters of RP-3 and RP-5 fuels

燃油种类	密度/ (g/m ³)	表面张力/ (N/m)	运动黏度/ 10 ⁻⁶ (m ² /s)
RP-3	779.1	0.022 8	1.48
RP-5	815.9	0.023 7	2.02

采用马尔文激光粒度仪测量 SMD, 试验前需完成马尔文系统标定,确定系统测量误差。采用标准粒子作为标定介质,取3次测量结果平均值,保证系统误差小于0.5%。

采用粒子图像测速仪(particle image velocimetry, PIV)测量油滴速度。对空间内的粒子在极短的时间内连续照射两次,同时拍摄得到两个粒子群的图像,通过相关算法处理得到瞬时的速度分布。本试验中采用燃油油滴作为示踪粒子。

采用燃油称重法测试喷嘴的流量,使用高精度的电子秤称量规定时间内不同压力下的流量。

采用划线法确定雾化锥角^[17],使用工业照相机拍摄燃油雾化图像,使用 Matlab 软件对原始图

像进行二值化处理,确定阈值后,如图3所示,取喷雾包线夹角 θ 作为喷嘴雾化锥角。

试验共8组工况,如表2所示,因发动机工作时主油路单独工作的工况,因此除燃油流量特性外不对主油路单独工作的情况进行研究。

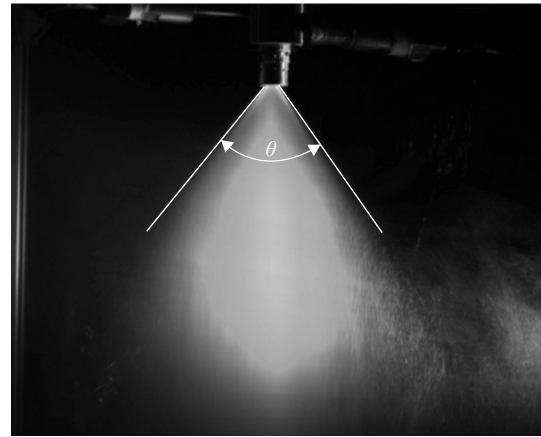


图3 获取二值化喷嘴雾化锥角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of binarization of nozzle atomization cone angle

表2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	副油路燃油流量/ (kg/h)	主油路燃油流量/ (kg/h)
1	4	0
2	8	0
3	12	0
4	14	0
5	15	0
6	12	15
7	14	40
8	15	59

试验测点布置如图4所示,在离喷嘴出口轴向距离 Z 为 20 mm 和 30 mm 处选择2个测量截面;在每个轴向测量截面上,在水平方向上相位角为 $0^\circ \sim 150^\circ$ 范围均匀布置6个测点。

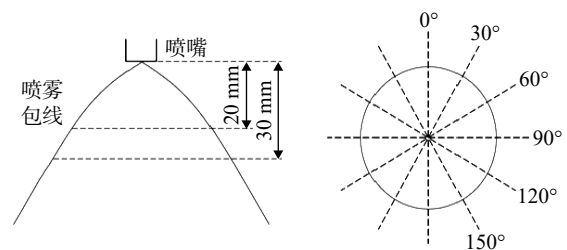


图4 测点位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring point positions

2 试验结果与分析

2.1 燃油流量

试验研究了不同压力下 RP-3 和 RP-5 燃油对喷嘴燃油流量的影响,副油路供油压力在 0.2~3.5 MPa,主油路供油压力在 0.01~0.2 MPa。

燃油流量特性试验结果如图 5、图 6 所示,从图中可以看出,主油路喷嘴供油压力 $\Delta p < 0.03$ MPa 时,RP-5 燃油的流量小于 RP-3 燃油,且随着 Δp 的增加,两者之间的流量差逐渐缩小;当 $\Delta p > 0.03$ MPa 时,RP-5 燃油的喷嘴流量大于 RP-3。

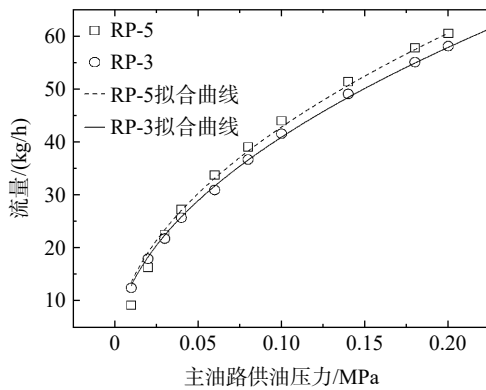


图 5 主油路供油压力-流量特性及拟合曲线

Fig. 5 Main fuel line pressure-flow characteristics and fitting curve

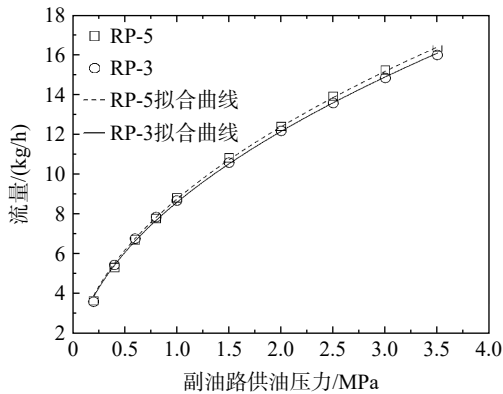


图 6 副油路供油压力-流量特性及拟合曲线

Fig. 6 Primary fuel line pressure-flow characteristics and fitting curve

通过试验数据,可以得到两种燃油的流量特性的拟合公式,主油路 RP-3 和 RP-5 燃油分别为 $q_{m,RP-3} = 129\Delta p^{0.5}$, $q_{m,RP-5} = 135\Delta p^{0.5}$;副油路 RP-3 和 RP-5 燃油分别为 $q_{m,RP-3} = 8.76\Delta p^{0.5}$, $q_{m,RP-5} = 8.59\Delta p^{0.5}$,其中 q_m 为流量。

可以看出拟合公式与试验数据符合性较好且是 $\Delta p^{0.5}$ 的函数,求流量相对差值时可以约去 $\Delta p^{0.5}$,

可以得到主油路流量相差 4.65% 左右。对于副油路,在整个测量范围内 RP-5 燃油的喷嘴流量都大于 RP-3 燃油,差值为 1.9%。

低供油压力时 RP-5 燃油流量比 RP-3 燃油小,是由于常温下 RP-5 燃油相比于 RP-3 燃油的黏性大幅提高且密度更高,黏性越大会导致燃油在油路的流动中的流动损失更大,低供油压力时由于黏性的影响更大,RP-5 燃油的喷嘴流量更低,而随着供油压力的增加,密度的影响比重逐渐提升,使得高供油压力时 RP-5 燃油的喷嘴流量更高^[18]。

还可以通过如式(1)解释此现象:

$$q_m = C_d A_{out} \sqrt{2\rho_f \Delta p} \quad (1)$$

式中 C_d 为流量系数, A_{out} 为喷嘴出口面积, ρ_f 为喷嘴液体密度。相同压力下,喷嘴出口面积 A_{out} 不变,假设流量系数 C_d 不变,RP-5 燃油密度大于 RP-3 燃油密度,故 RP-5 燃油流量大于 RP-3 燃油流量。流量系数 C_d 不变时,可以推导出理论上的差异值 σ 如式(2)所示。

$$\sigma = \frac{\sqrt{\rho_{l,RP-5}} - \sqrt{\rho_{l,RP-3}}}{\sqrt{\rho_{l,RP-3}}} \approx 2.3\% \quad (2)$$

式中 $\rho_{l,RP-3}$ 为 RP-3 燃油的密度, $\rho_{l,RP-5}$ 为 RP-5 燃油的密度。而主油路流量增加的百分比大是因为流量系数 C_d 除了与喷嘴油路尺寸有关,还会随着雷诺数变化,如式(3)所示。

$$C_d = 0.45 Re^{-0.02} \left(\frac{l_0}{d_0} \right)^{-0.03} \left(\frac{L_s}{D_s} \right)^{0.05} \left(\frac{A_p}{D_s d_0} \right)^{0.52} \left(\frac{D_s}{d_0} \right)^{0.23} \quad (3)$$

式中 Re 为雷诺数, l_0 为喷嘴等直段长度, d_0 为喷嘴口直径, L_s 为旋流室长度, D_s 为旋流室直径, A_p 为总进口槽面积。

由式(3)^[19]可以推出当雷诺数大时流量系数小,雷诺数小时流量系数大。将燃油由 RP-3 燃油更换为 RP-5 燃油后,密度和速度小幅度增加,运动黏度增加 40% 多,雷诺数将降低,流量系数增加,更换 RP-5 燃油后流量应增加 2.3% 以上。流量系数与雷诺数成幂函数关系,主油路雷诺数较小,雷诺数的变化容易造成较大的流量系数变化,所以试验数据的差值与理论值有差别,由于副油路雷诺数较大,流量系数基本不变,所以差异接近理论值 2.3%,这一结论符合试验结果。

2.2 喷嘴雾化锥角

试验研究了不同流量下 RP-3 和 RP-5 燃油对雾化锥角的大小与变化趋势,结果如图 7 所示。

试验结果表明:副油路单独供油时,随着副油路流量增大,RP-3 和 RP-5 燃油的雾化锥角都呈现出减小的趋势,雾化锥角最大约为 116° ,最小约为 75° ,整体减小了 35%;当流量增大至 12 kg/h 后,雾化锥角基本保持不变,在 75° 左右;主、副油路同时供油时,随着流量增大,雾化锥角增加,雾化锥角最大约为 87° ,最小约为 79° ,增加了 10%;副油路供油压力相同时,主、副油路同时供油时雾化锥角更大;RP-3 和 RP-5 燃油的雾化锥角变化趋势相同,且雾化锥角大小基本相同,说明燃油物性参数对雾化锥角影响较小。

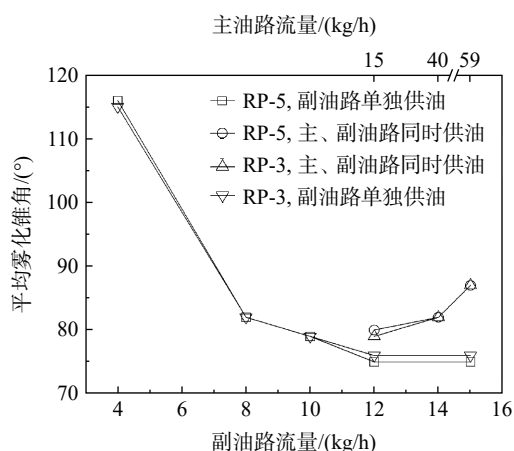


图7 不同流量下 RP-3 和 RP-5 燃油雾化锥角对比

Fig. 7 Comparison of atomization cone angles using RP-3 fuel and RP-5 fuel at different mass flow rates

根据已有研究表明,雾化锥角与喷嘴内的流动状态和出口尺寸有关,具体关系如式(4)所示。

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{0.008\,05\sqrt{\rho_f}F_n}{d_0t} = \frac{0.008\,05\sqrt{2\rho_f}C_dA_{out}}{d_0t} \quad (4)$$

式中 θ 为雾化锥角, F_n 为流量数, t 为液膜厚度。式(4)为单油路的雾化锥角关系式,因此主要分析不同燃油对副油路雾化锥角的影响,预测不同燃油对主油路的雾化锥角差异。

根据对喷嘴流量特性的分析,副油路的流量系数基本不发生改变。液膜厚度 t 是由有效截面系数确定,有效截面系数由流量系数确定,因此可以认为液膜厚度 t 也不变,则雾化锥角只与燃油密度的 0.5 次方成正比,由密度引起的差异与流量的理论值一致,约为 2.3%。但实际上更换 RP-5 燃油后,流量系数增大,液膜厚度 t 也增大,但增大的百分比很小,真实情况是基本不变,因此半雾化锥角的余弦值变大,则可知由 RP-3 燃油更换为 RP-5 燃油后,引起副油路雾化锥角的差异

应该小于 2.3%,这一结论与试验结果相符。主油路由于流量系数增加得更多,使用不同燃油引起雾化锥角的差异小于副油路雾化锥角的差异。

副油路单独供油与主、副油路同时供油的雾化锥角趋势不一致则是由于主油路的雾化锥角较大,单独供油时约为 100° ,在流量较小时主、副油路融合时互相影响,导致雾化锥角处于中间状态,随着工况变化,主油路所占比例的增加,雾化锥角由主油路占主导,雾化锥角逐渐增大。

2.3 油滴速度

通过 PIV 与片状光源对喷嘴流场进行拍摄可以获得雾化场流场流动趋势的速度流线和显示速度大小的速度云图,如图 8 所示。图中 X 为喷嘴雾化场中沿喷嘴的轴向坐标, Y 为径向坐标。

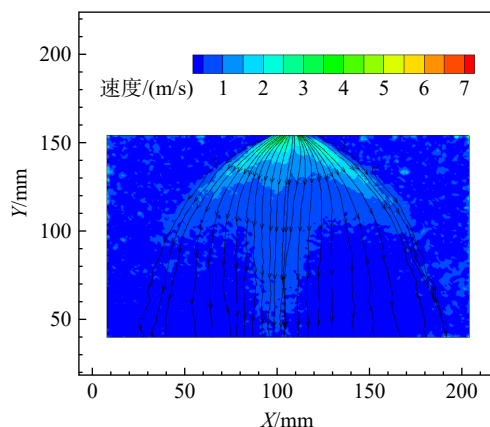


图8 喷嘴雾化场流线图和速度云图

Fig. 8 Streamline diagram and velocity cloud diagram of spray field

对 RP-3 燃油与 RP-5 燃油,在流量为 4 kg/h 工况下,选取距离喷口为 $Z=30 \text{ mm}$ 截面上水平 6 个相位点油滴速度。油滴速度的分布分别如图 9 与图 10 所示。油滴速度呈现两侧峰式“M”形分布,中心与两侧速度远低于锥角处速度。

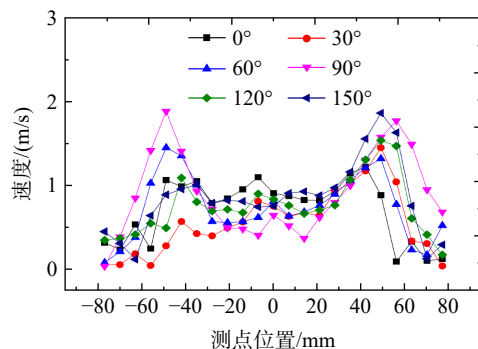


图9 RP-3 燃油雾化场油滴速度分布

Fig. 9 Droplet velocity distribution in RP-3 fuel spray field

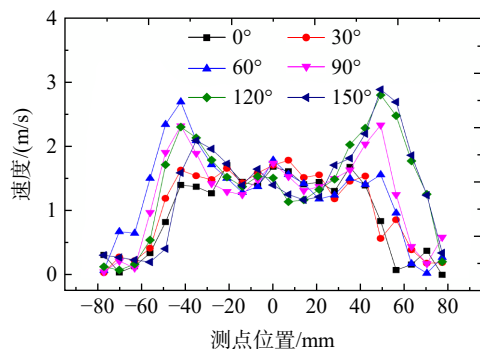
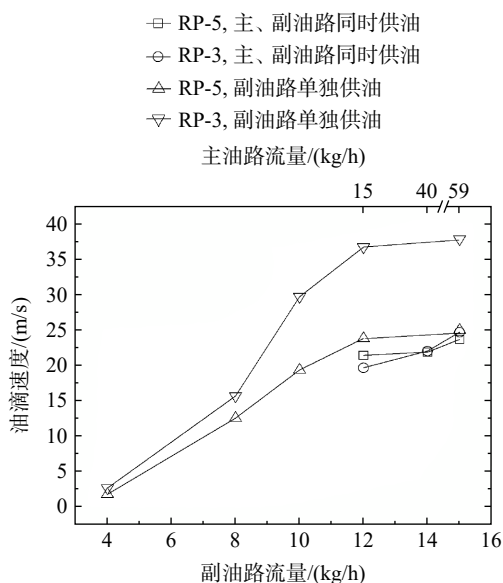
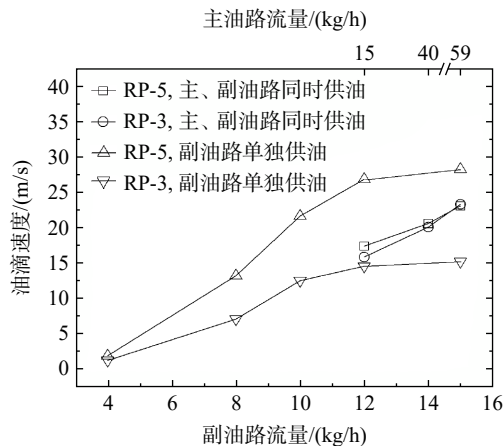


图 10 RP-5 燃油雾化场油滴速度分布

Fig. 10 Droplet velocity distribution in RP-5 fuel spray field

在表1的各工况流量下,对 $Z=20\text{ mm}$ 和 $Z=30\text{ mm}$ 轴向测试截面上 21 个水平测试点的两处峰值油滴速度取平均值,结果如图 11、图 12 所示。可以看出,在各流量以及轴向测试截面上,随着相对喷射压力的升高,喷射速度增大,RP-3 和 RP-5 燃油在雾化过程中油滴的速度逐渐增大;在各相对喷射压力下,随着离喷嘴出口轴向距离的增加,RP-3 和 RP-5 燃油在雾化过程中油滴的速度逐渐减小。不同工况随着燃油流量增加的增长幅度也逐渐减小。同时,在各相对喷射压力以及轴向测试截面上,RP-5 燃油雾化过程中油滴的速度要显著高于 RP-3 燃油。油滴速度主要与油滴粒径有关,当粒径变大时,油滴的惯性更大,保持速度的能力将会随之增加。RP-5 燃油的 SMD 要小于 RP-3 燃油,导致其油滴速度要高于 RP-3 燃油。

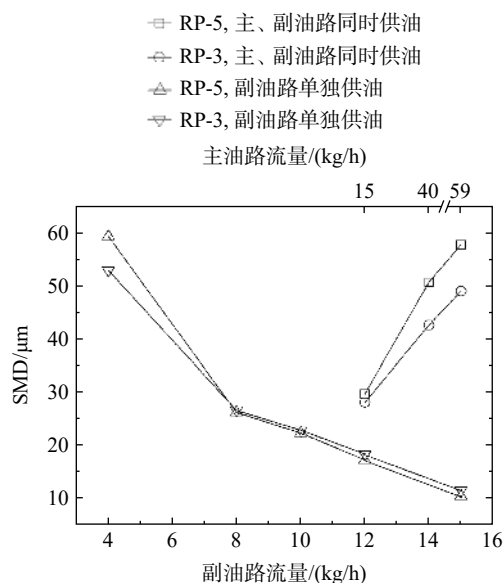
图 11 不同工况下 RP-3 燃油与 RP-5 燃油的油滴速度 ($Z=20\text{ mm}$)Fig. 11 Droplet velocities of RP-3 fuel and RP-5 fuel at different working conditions ($Z=20\text{ mm}$)图 12 不同工况下 RP-3 燃油与 RP-5 燃油的油滴速度 ($Z=30\text{ mm}$)Fig. 12 Droplet velocities of RP-3 fuel and RP-5 fuel at different working conditions ($Z=30\text{ mm}$)

RP-3 燃油的速度整体低于 RP-5 燃油。

2.4 SMD

试验研究了不同流量下使用 RP-3 燃油与 RP-5 燃油对 SMD 产生的影响,测量了喷口下游 20 mm 和 30 mm 处的雾化粒径数据,结果如图 13 和图 14 所示。

图 13 中对使用 RP-3 燃油与 RP-5 燃油喷口下游 20 mm 处平均粒径进行了对比,可以得到:副油路单独供油时,随着副油路流量的增大,雾化粒径逐渐减小,RP-3 燃油与 RP-5 燃油的雾化质量的差异也逐渐减小;主、副油路同时供油时,

图 13 不同工况下 RP-3 燃油与 RP-5 燃油的 SMD ($Z=20\text{ mm}$)Fig. 13 SMD of RP-3 fuel and RP-5 fuel at different working conditions ($Z=20\text{ mm}$)

随着流量的增大,雾化粒径逐渐增大,雾化粒径从 $28\ \mu\text{m}$ 增至 $50\ \mu\text{m}$,且相比于相同副油路流量下仅副油路单独供油的工况,雾化粒径明显增大;两种不同物性的燃油对喷嘴的雾化粒径存在影响,副油路单独供油时影响较小,除 $4\ \text{kg/h}$ 时其余工况基本相同,差值均小于 $1.2\ \mu\text{m}$,主、副油路同时供油时相差较大,RP-5 燃油的粒径大于 RP-3 燃油,最大差值接近 $9\ \mu\text{m}$ 。图 14 为 RP-3 燃油与 RP-5 燃油在喷口下游 $30\ \text{mm}$ 处的平均粒径,可以看出其规律基本与喷口下游 $20\ \text{mm}$ 处的平均粒径相同,但两种燃油粒径相差更大,最大相差为 $15.7\ \mu\text{m}$ 。

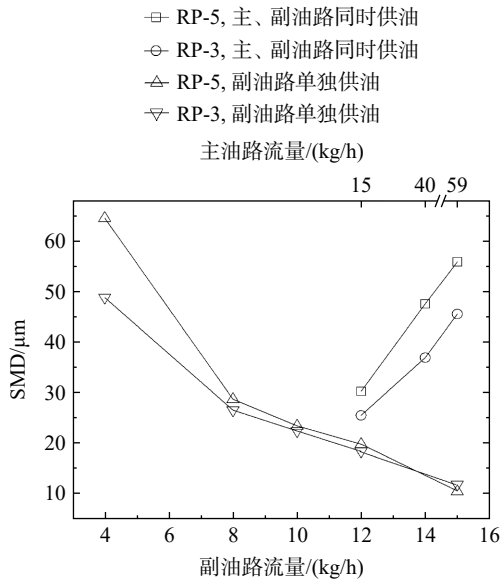


图 14 不同工况下 RP-3 燃油与 RP-5 燃油的 SMD
($Z=30\ \text{mm}$)

Fig. 14 SMD of RP-3 fuel and RP-5 fuel at different working conditions ($Z=30\ \text{mm}$)

对副油路单独工作的较大 SMD 的情况进行分析,这时不同燃油引起雾化质量的差异最大,能得到百分比差异的上限值。选用副油路流量为 $4\ \text{kg/h}$ 的工况下在 $Z=20\ \text{mm}$ 截面的 SMD 结果,具体结果如图 13 所示,此时 RP-3 燃油的 SMD 为 $52.91\ \mu\text{m}$,RP-5 燃油的 SMD 为 $59.91\ \mu\text{m}$,SMD 最大差值为 12.1% 。下面将从已有理论对该值进行分析。

假设燃油的种类不影响流量系数,根据经验关系式(5)估算燃油物性对 SMD(量符号记为 D_{Sm})的影响。

$$D_{\text{Sm}} = 2.25\sigma^{0.25}\nu^{0.25}q_m^{0.25}\Delta p^{-0.25}\rho_a^{-0.25} \quad (5)$$

式中 σ 为表面张力 (kg/s^2), ν 为运动黏度 (m^2/s), q_m 为流量 (kg/s), Δp 为供油压力 (Pa), ρ_a 为空气密度

(kg/m^3)。根据燃油流量公式(1),变换得到燃油喷嘴前后供油压力与流量的关系为

$$q_m = \sqrt{2}C_d A_{\text{out}} \rho_f^{0.5} \Delta p^{0.5} \Rightarrow \Delta p = \frac{q_m^2}{2C_d^2 A_{\text{out}}^2 \rho_f} \quad (6)$$

代入经验关系式(5)得到

$$D_{\text{Sm}} = 2.25\sigma^{0.25}\nu^{0.25}q_m^{0.25} \frac{q_m^{0.5}}{C_d^{-0.5} A_{\text{out}}^{-0.5} \rho_f^{0.25} \rho_a^{-0.25}} \quad (7)$$

两种燃油的 A_{out} 、 ρ_a 、 q_m 为常数且相同,表面张力 σ 已知,假设流量系数 C_d 为常数且已知,将式(7)中常数的乘积用 K 表示,将式子写为

$$D_{\text{Sm}} = K\sigma^{0.25}\nu^{0.25}\rho_f^{0.25} \quad (8)$$

用式(8)估算 RP-5 和 RP-3 燃油物性对雾化质量的影响,差异值 Δ 如式(9)所示:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{K\sigma_{\text{RP-3}}^{0.25}\nu_{\text{RP-3}}^{0.25}\rho_{\text{f,RP-3}}^{0.25} - K\sigma_{\text{RP-5}}^{0.25}\nu_{\text{RP-5}}^{0.25}\rho_{\text{f,RP-5}}^{0.25}}{K\sigma_{\text{RP-3}}^{0.25}\nu_{\text{RP-3}}^{0.25}\rho_{\text{f,RP-3}}^{0.25}} \Rightarrow \\ \Delta &= \frac{\sigma_{\text{RP-3}}^{0.25}\nu_{\text{RP-3}}^{0.25}\rho_{\text{f,RP-3}}^{0.25} - \sigma_{\text{RP-5}}^{0.25}\nu_{\text{RP-5}}^{0.25}\rho_{\text{f,RP-5}}^{0.25}}{\sigma_{\text{RP-3}}^{0.25}\nu_{\text{RP-3}}^{0.25}\rho_{\text{f,RP-3}}^{0.25}} \Rightarrow \\ \Delta &= 10.67\% \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)说明了当燃油流量一致时,雾化质量的差异与表面张力、燃油密度和燃油运动黏度是密切相关的,理论差异值为 10.67% ,但实际上更换 RP-5 燃油后,流量系数增大,这将导致 SMD 实际的差异值大于理论值,这与试验分析结果基本一致。这也同样说明了主、副油路同时供油在更换 RP-5 燃油后雾化质量较 RP-3 燃油差的原因。

主、副油路工况随着压力的升高雾化逐渐变差则是由于主油路在流量较小时雾化较差,单独供油时雾化锥角还处于未展开的情况,但流量相对于副油路大,因此主油路流量较小时可以依靠副油路在主、副油路液膜融合的情况下达到较好雾化效果^[20],随着主油路流量所占比例的增加,这种辅助效果逐渐变差,导致雾化效果变差。

低供油压力时两种燃油雾化锥角差异不大,雾化质量差异大,且 RP-5 燃油的雾化质量更差,此时接近燃烧室点火时的工况。文献[4]和文献[5]均出现了在 $-40\ ^\circ\text{C}$ RP-5 燃油点火不成功而 RP-3 燃油点火成功的结果。根据式(9)进行分析,相同流量下两种燃油的 SMD 差异主要取决于表面张力、运动黏度和两种燃油此时的密度。文献[6]中在 $-40\ ^\circ\text{C}$ 测得的两种燃油的数据。RP-3 燃油的运动黏度为 $5.84 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$,RP-5 燃油的运动黏度为 $11.3 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$,表面张力差异不大,RP-3

燃油为 0.027 8 N/m, RP-5 燃油为 0.028 8 N/m, 缺少此时的燃油密度数值, 但一般来说, 煤油的密度与温度具有很强的线性关系, 因此假设此时两种燃油的差异相对百分比不变, 此时根据式(9)获得的差异值 Δ 为 20.43%, 远高于常温下的雾化差异 10.61%, 因此 RP-5 燃油低温下点火失败是由于雾化质量变差, 与 RP-3 燃油低温下雾化质量差异更大, 更深层的原因在于低温下 RP-5 燃油运动黏度的急剧增长。

3 结 论

1) 主油路供油, 供油压力小于 0.03 MPa 时, 由于运动黏度的作用, RP-5 燃油的流量小于 RP-3 燃油的流量, 大于 0.03 MPa 时, RP-5 燃油的流量大于 RP-3 燃油的流量。副油路供油, RP-5 燃油的流量大于 RP-3 燃油的流量, 主油路流量相差约为 5%, 副油路流量相差约为 2%。

2) RP-3 燃油与 RP-5 燃油的雾化锥角结果基本一致。副油路单独供油时雾化锥角随着流量的增加从 116°逐渐减小至 75°后基本稳定不变, 主、副油路同时供油雾化锥角则随着燃油流量的增加从 79°逐渐增大至 87°。

3) 副油路供油时, 随着燃油流量的增加, 两种燃油的 SMD 均逐渐减小, 雾化质量变好; 当副油路供油流量小于 8 kg/h 时, RP-5 燃油的 SMD 大于 RP-3 燃油, 副油路供油流量大于 8 kg/h 时, RP-5 和 RP-3 燃油的 SMD 基本一致。主、副油路同时供油时, 随着燃油流量的增加 SMD 逐渐增大, RP-5 燃油的 SMD 要大于 RP-3 燃油且差值不断增大。

4) 随着供油流量的降低与出口轴向距离的增加, RP-5 燃油与 RP-3 燃油油滴的速度逐渐减小; 副油路在供油流量相同的情况下 RP-5 燃油的油滴速度显著高于与 RP-3 燃油的油滴速度。主、副油路同时供油时 RP-5 燃油的油滴速度与 RP-3 燃油的油滴速度相近且都呈现出“M”形分布。

参考文献:

- [1] ZHENG L, LU C B, AN G J, et al. Comparative study on combustion and explosion characteristics of high flash point jet fuel[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 84: 377-383.
- [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.
- [3] 金如山, 索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [4] 王良, 李维, 刘丽娟, 等. RP-3和RP-5燃油对全环回流燃烧室点火性能影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 206-214.
- WANG Liang, LI Wei, LIU Lijuan, et al. Study on effects of RP-3 and RP-5 jet fuels on ignition performance of full annular reverse flow combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8): 206-214. (in Chinese)
- [5] 祁斌, 刘涛, 杨彩琼, 等. 某型涡轴发动机高低温起动性能试验与分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(10): 2029-2035.
- QI Bin, LIU Tao, YANG Caiqiong, et al. Test and analysis on high and low temperature starting performance of a turboshaft engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(10): 2029-2035. (in Chinese)
- [6] 任伟, 王涛. RP-3和RP-5煤油对飞机动力装置和燃油系统试飞的影响[J]. 工程与试验, 2014, 54(1): 49-51.
- REN Wei, WANG Tao. Effects of RP-3 and RP-5 kerosene on flight test of aircraft power plant and fuel system[J]. *Engineering and Test*, 2014, 54(1): 49-51. (in Chinese)
- [7] MUNZAR J D, AKIH-KUMGEH B, DENMAN B M, et al. An experimental and reduced modeling study of the laminar flame speed of jet fuel surrogate components[J]. *Fuel*, 2013, 113: 586-597.
- [8] ABIANEH O S, CHEN C P, MAHALINGAM S. Numerical modeling of multi-component fuel spray evaporation process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 69: 44-53.
- [9] NARAYANASWAMY K, PITSCH H, PEPIOT P. A component library frame work for deriving kinetic mechanisms for multi-component fuel surrogates: application for jet fuel surrogates[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 165: 288-309.
- [10] 张涛. 航空燃油/乙醇混合燃油旋转锥形液膜雾化特性研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2019.
- ZHANG Tao. Effect of kerosene/ethanol blends on spray characteristics of swirling conical liquid sheets[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 刘靖, 胡二江, 黄佐华, 等. RP-3航空燃油与其模型燃料雾化特性的对比试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(4): 765-773.
- LIU Jing, HU Erjiang, HUANG Zuohua, et al. Comparative experiment of atomization characteristics of RP-3 kerosene and surrogate fuel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(4): 765-773. (in Chinese)
- [12] 王成军, 张宝诚, 马金凤. 一种双路离心式喷嘴雾化性能的研究[J]. 节能, 2008, 27(2): 7-8.
- WANG Chengjun, ZHANG Baocheng, MA Jinfeng. Study on atomization performance of a dual-orifice pressure-swirl atomizer[J]. *Energy Conservation*, 2008, 27(2): 7-8. (in Chinese)
- [13] 徐丽, 孙丽艳. QD128燃气轮机燃料适应性试验研究[J]. 汽轮机技术, 2015, 57(1): 43-45.
- XU Li, SUN Liyan. Experimental study on fuel adaptability of QD128 gas turbine[J]. *Turbine Technology*, 2015, 57(1): 43-45. (in Chinese)
- [14] 徐丽, 张宝诚, 刘凯. 航改燃气轮机改用柴油的适应性试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(1): 30-33.
- XU Li, ZHANG Baocheng, LIU Kai. Experimental study on fuel adaptability of diesel oil for aero-derivative gas turbine[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2015, 28(1): 30-33. (in Chinese)
- [15] 刘爱骥, 王栋, 于浩洋, 等. 燃油温度对离心式喷嘴雾化性能影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(9): 1793-1800.
- LIU Aiguo, WANG Dong, YU Haoyang, et al. Effect of fuel temperature on atomization characteristics of centrifugal nozzle[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(9): 1793-1800. (in Chinese)

- [16] 王家俊, 桂韬, 邱伟, 等. 燃油温度对离心喷嘴雾化特性影响的试验[J]. 航空动力学报, 2020, 35(8): 1643-1654.
WANG Jiajun, GUI Tao, QIU Wei, et al. Experiment on the influence of fuel temperature on the atomization characteristics of centrifugal nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(8): 1643-1654. (in Chinese)
- [17] 陈富鑫, 何小民, 周建伟. 不同喷口扩张角下离心喷嘴雾化锥角特性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 224-232.
CHEN Fuxin, HE Xiaomin, ZHOU Jianwei. Effects of trumpet angle on spray angle characteristics of pressure swirl atomizer[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(7): 224-232. (in Chinese)
- [18] 李辉, 龚景松, 朴英, 等. 煤液化油在雾化过程中的流量特性研究[J]. 推进技术, 2016, 37(8): 1515-1521.
LI Hui, GONG Jingsong, PIAO Ying, et al. Investigation of flow rate characteristics of coal liquefied oil under atomization process [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(8): 1515-1521. (in Chinese)
- [19] LEFEBVRE A H. Atomization and sprays[M]. New York, US: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [20] 申力鑫, 邢菲, 秦腊, 等. 双层旋转锥形液膜一次破碎特性数值研究[J]. 航空学报, 2021, 42(12): 625267.1-625267.13.
SHEN Lixin, XING Fei, QIN La, et al. Numerical study on primary breakup characteristics of dual-layer rotating conical liquid sheets[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(12): 625267.1-625267.13. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)