

文章编号: 1000-8055(2026)11-20250265-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250265

离心喷嘴低温燃油特性试验研究

唐 锐^{1,2}, 闵 明¹, 朱德勇^{1,2}

- (1. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵阳 550081;
2. 贵州省航空发动机转子结构完整性全省重点实验室, 贵阳 550081)

摘 要: 搭建喷嘴特性试验系统, 研究不同燃油温度下 RP-3 和 RP-5 燃油对单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)、液滴尺寸分布等性能的影响。结果表明: 相同供油压力下, 随着燃油温度从 20 ℃ 降至 -30 ℃, RP-3 和 RP-5 燃油的密度、运动黏度和表面张力增大, 喷嘴质量流量增加, 各温度工况下 RP-5 燃油的质量流量比 RP-3 大 2%~4%; 雾化锥角减小, RP-3 燃油雾化锥角减小 14%, RP-5 燃油雾化锥角减小 23%; SMD 增大, 液滴尺寸分布指数先减小后增大, 说明燃油温度降低导致了液滴的平均尺寸变大, 但液滴尺寸的不均匀性有所减小, 液滴尺寸分布变得更加集中。

关 键 词: RP-3 燃油; RP-5 燃油; 质量流量特性; 雾化特性; 雾化锥角; 索太尔平均直径
中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Experimental study on low-temperature fuel characteristics of pressure-swirl atomizer

Tang Rui^{1,2}, Min Ming¹, Zhu Deyong^{1,2}

- (1. Guiyang Engine Design and Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Guiyang 550081, China;
2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Aero Engine Rotor Structural Integrity,
Guiyang 550081, China)

Abstract: An experimental system was built to study the effects of RP-3 and RP-5 fuels at different fuel temperatures on the flow rate characteristics, cone angle, Sauter mean diameter (SMD) and droplet size distribution. The results showed that under the same fuel pressure, as the fuel temperature decreased from 20 ℃ to -30 ℃, the density, kinematic viscosity, and surface tension of RP-3 and RP-5 fuels increased, and the flow rate also increased. The flow rate of RP-5 fuel was 2% to 4% higher than that of RP-3; the cone angle decreased by 14% for RP-3 fuel and 23% for RP-5 fuel; as SMD increased, the droplet size distribution index first decreased and then increased, indicating that the decrease in fuel temperature led to an increase in the average droplet size, but the unevenness of droplet size decreased and the droplet size distribution became more concentrated.

Keywords: RP-3 fuel; RP-5 fuel; flow rate characteristics; atomization characteristics; atomization cone angle; Sauter mean diameter

随着航空发动机性能要求的不断提高, 发动机燃烧室面临更复杂多变的点火工况, 如海洋环

境、低温环境等。海洋环境中, 舰载飞机静电不容易释放, 静电积累量较大, 空中加油过程中发

收稿日期: 2025-06-04

作者简介: 唐锐(1995—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事航空发动机燃烧室零部件试验与测试研究。E-mail: tangrui710@163.com

引用格式: 唐锐, 闵明, 朱德勇. 离心喷嘴低温燃油特性试验研究[J]. 航空动力学报, 2026, 41(11): 20250265. Tang Rui, Min Ming, Zhu Deyong. Experimental study on low-temperature fuel characteristics of pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(11): 20250265.

生静电点火爆炸的可能性较高,因此多采用闪点更高、密度更大的 RP-5 燃油,降低舰载飞机静电点火爆炸的可能性^[1-2]。

低温环境对发动机燃烧室喷嘴性能的影响尤为显著,其质量流量特性和雾化质量对于燃烧室在低温环境下的点火性能和燃烧效率至关重要。早在 2002 年胡九生等^[3]的低温起动试验方法及主要注意事项,为后续低温试验研究奠定了基础。Shin 等^[4]通过低温条件下燃油雾化特性研究发现,相较于常温、高温工况,低温环境下的燃油雾滴粒径显著增大,且运动速度下降。不过随着供油压差的增大,粒径随之明显减小。付淑青等^[5]和宋阁等^[6]开展的-40 ℃ 至常温下的喷嘴雾化试验进一步证实了低温对喷嘴雾化效果的显著影响,其表现为雾锥体积缩小、油雾密度降低以及粒径变大。祁斌等^[7]和王良等^[8]分别通过涡轴发动机起动试验和全环燃烧室低温点火试验研究,揭示了 RP-3 和 RP-5 燃油在-40 ℃ 低温环境下的起动点火差异。二者研究均表明,在常温和高温条件下,RP-3 和 RP-5 燃油点火及起动性能相近;但在-40 ℃ 低温条件下,RP-3 燃油点火起动成功,而 RP-5 燃油均失败,涡轴发动机经过调油等措施,其点火成功的温度也仅在-20 ℃。

在燃油物性方面,主要集中在柴油、RP-3 燃油和其他混合燃料的雾化特性研究。如徐丽等^[9-10]对比了柴油和 RP-3 燃油的雾化特性;刘靖等^[11]对比了 RP-3 燃油与其模型燃料的雾化特性;张涛^[12]、Ghose 等^[13]、Patra 等^[14]和宋澜波^[15]通过试验研究了航空燃油与乙醇混合燃料的雾化性能;付淑青等^[5]、王家俊等^[16]、刘爱骥等^[17]研究了 RP-3 燃油在不同温度下的雾化特性。

综上所述,燃油的物性参数和环境条件与喷嘴雾化特性及燃烧室性能息息相关。国内外学者主要针对 RP-3 燃油和其他混合燃料的雾化特性和发动机点火起动特性开展了广泛研究和试验对比,但专门针对 RP-3 和 RP-5 燃油在低温条件下的雾化特性研究较少。为此,本文通过搭建喷嘴特性试验系统,比对 RP-3 和 RP-5 燃油在不同温度条件下对单油路离心喷嘴的质量流量特性和雾化质量的影响,其中雾化质量用雾化锥角、雾化粒度及尺寸分布、雾化均匀度等特性参数来定量描述^[18]。良好的雾化质量意味着液滴更细小、分布更均匀,这有助于提高燃烧效率和减少排放^[19]。通过试验研究,为燃烧室低温燃油点火性能和海

洋环境下由 RP-5 替换 RP-3 燃油提供数据支持。

1 试验系统及方法

1.1 试验件

试验采用单油路离心喷嘴,结构如图 1 所示。燃油经油滤后进入旋流室,燃油的压力势能转化为动能,在旋流室中做离心运动,以旋转液膜的形式流过喷口,喷出后液体受到外力(气动力、惯性力)与内力(表面张力、黏性力)之间的相互作用,破碎形成液滴。

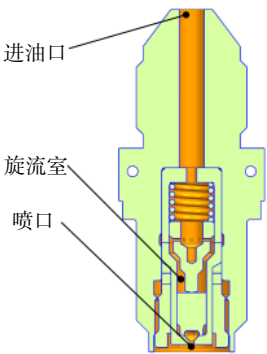


图 1 离心喷嘴
Fig. 1 Pressure-swirl atomizer

1.2 试验介质及工况

试验采用符合 GB6537-2006 的 RP-3 燃油和符合 GJB 560A-97 的 RP-5 燃油进行研究。低温下燃油的物性,主要包括密度、表面张力和运动黏度,都会发生较大变化,对喷嘴的雾化特性造成影响,最终影响燃烧室的点火性能。RP-3 和 RP-5 燃油的主要物性参数见表 1。随着燃油温度

表 1 燃油物性参数
Table 1 Physical properties of fuels

温度/℃	燃油物性	测量精度	RP-3	RP-5
20	密度/(kg/m ³)	0.000 05 g/cm ³	779.6	815.9
	表面张力/(mN/m)	0.1%	22.8	23.7
	运动黏度/(mm ² /s)	0.1%	2.1	2.2
0	密度/(kg/m ³)	0.000 05 g/cm ³	792.7	827.8
	表面张力/(mN/m)	0.1%	24.8	25.7
	运动黏度/(mm ² /s)	0.1%	3.2	3.5
-15	密度/(kg/m ³)	0.000 05 g/cm ³	822.5	838.3
	表面张力/(mN/m)	0.1%	25.7	26.7
	运动黏度/(mm ² /s)	0.1%	4.6	5.3
-30	密度/(kg/m ³)	0.000 05 g/cm ³	833.2	854.1
	表面张力/(mN/m)	0.1%	26.9	27.9
	运动黏度/(mm ² /s)	0.1%	6.7	9.0

由 20 ℃ 降低至 -30 ℃, 燃油密度增大, 运动黏度增加, 表面张力增大。其中, RP-3 和 RP-5 燃油密度和表面张力的增长幅度大致相当, 分别增大了 6% 和 18% 左右; 而 RP-3 燃油的运动黏度增幅小于 RP-5, 相比常温工况 RP-3 燃油的运动黏度增大了 219%, RP-5 增大了 309%。

结合试验设备能力和喷嘴工作环境, 确定试验工况如下: 喷嘴进口供油压力为 0.45 MPa, 燃油

温度分别为 20、0、-15 ℃ 和 -30 ℃; 喷嘴出口保持大气环境压力和温度。

1.3 试验系统及方法

1.3.1 试验系统原理

喷嘴特性试验系统原理如图 2 所示, 主要由雾化舱、燃油系统、光学测量系统、数据采集系统、引风系统等组成, 燃油路全程管道需包裹保温棉以降低温度损失。

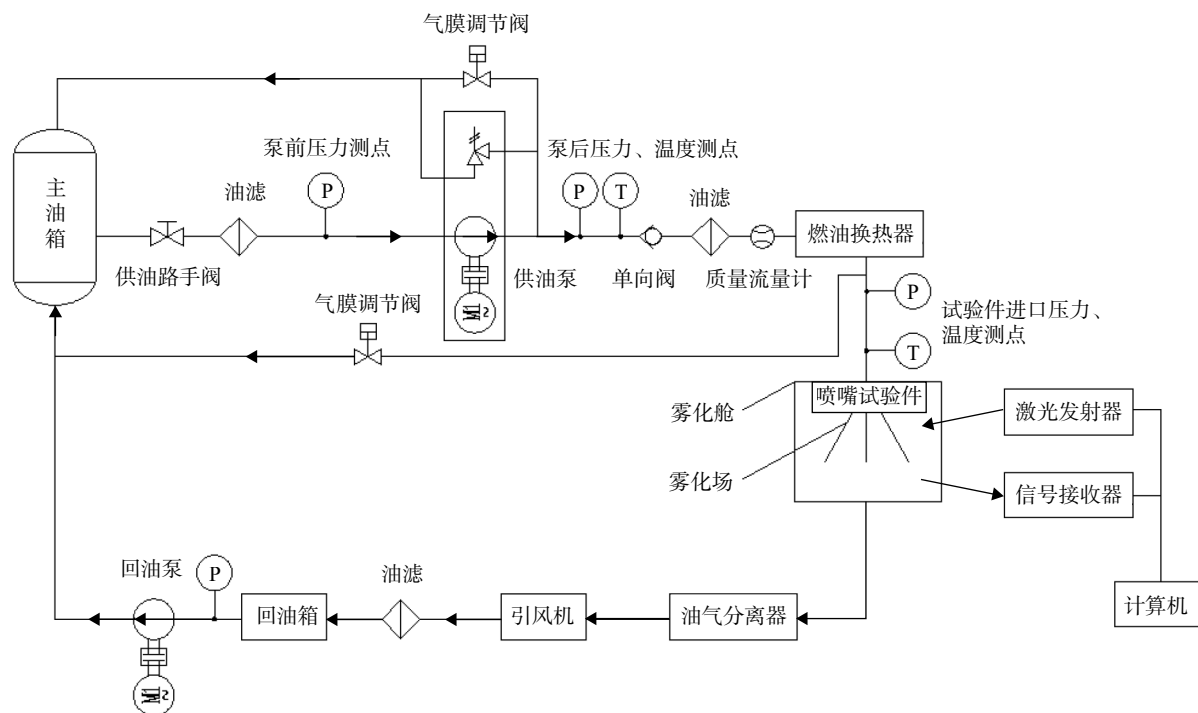


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

试验前, 通过回油路循环换热将主油箱温度降至 0 ℃, 实现燃油路全程管道预冷, 管道与环境温度达到换热平衡, 温度损失为确定值。试验时, 设置合适的燃油换热器降温功率, 匹配调节供油泵转速、供油路和回油路气膜阀开度, 获取试验需要的燃油质量流量和温度, 燃油流经单向阀、油路、质量流量计、燃油换热器后进入试验件。喷嘴进口前 40~100 mm 处分别布置有燃油温度测点和压力测点, 监测试验状态参数。试验雾化舱下设有回油路收集燃油, 根据试验工况调节引风机转速, 在不干扰雾化场的情况下实现燃油抽吸和回收, 经油气分离器和油滤后进入回油箱。

1.3.2 质量流量特性试验方法

采用质量流量计测量喷嘴的质量流量, 测量精度为 0.1%。在一定供油压差下, 测量不同燃油温度下, 60 s 内流经喷嘴的燃油质量。

1.3.3 雾化锥角试验方法

雾化锥角主要影响燃油浓度分布, 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^[20], 从而影响燃烧室火焰稳定性和温度场分布^[21]。

采用图像法获取雾化锥角。应用工业相机拍摄雾化场照片, 基于 LabVIEW 编写图像和数据处理程序, 能够在计算机屏幕上直接读出锥角数据。测量时, 选择距离喷口 40 mm 截面位置与喷雾包络线的交点和喷口中心连线之间的夹角。在喷嘴进口供油压力为 0.45 MPa 条件下, 调节不同的燃油温度, 每个工况下以喷嘴的理想中心为轴线旋转 90°, 共进行 3 次拍摄, 计算样本 3 次测量的平均值作为最后的锥角数据。

1.3.4 雾化粒度试验方法

雾化粒度主要影响蒸发速度和燃烧速度。工

程中,一般采用索太尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD)来表征雾化粒度,即:存在一个直径为 D_{32} (见式(1))的液滴群,其总表面积和体积与真实的液滴群相同,而液滴数目可以不同^[22]。

$$D_{32} = \frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2} \quad (1)$$

式中 d_i 为第 i 组液滴的直径。

采用 TSI 公司的相位多普勒粒子分析仪(phase Doppler particle analyzer, PDPA)测量液滴尺寸。PDPA 为点测量系统,如图 3 所示,以喷嘴的喷口中心为圆心,以 3 mm 为步长,采集距离喷口 30 mm 截面位置的 x 和 y 正、负两个方向上半径为 r 的 4 条线段,最后将 4 处相等半径位置的数据取平均值,以减小人为误差。

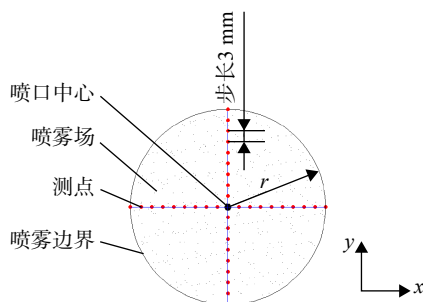


图 3 采集路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of collection path

1.3.5 雾化均匀度试验方法

液滴从喷嘴喷射出来时的大小是不均等的,液滴分布不均匀容易导致出口温度场不均匀。工程中,雾化均匀度通过液滴尺寸分布来表达。液滴尺寸分布同时描述了液滴直径大小和不同直径液滴的数量,通常采用数量积分分布、质量积分分布、数量的微分分布和质量的微分分布 4 种形式表达^[23]。但是理论上还无法找到这些分布的具体形式,实践中普遍通过试验建立经验公式 Rosin-Rammler 分布函数(见式(2))来表达。

$$R = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{\bar{d}} \right)^n \right] \quad (2)$$

式中 d 为液滴直径, R 为液滴直径小于 d 的累积液滴质量(或体积)占总质量(或总体积)的百分数; $\bar{d}$ 为特征直径,指质量(或体积)分布中 $1-R=e^{-1}$ 所对应的液滴直径; n 为液滴分布指数, n 越大表示液滴直径越均匀^[24]。

2 试验结果与分析

2.1 质量流量特性

在喷嘴进口供油压力分别为 0.225、0.45 MPa 和 0.675 MPa 的条件下,测取了不同燃油温度工况下 RP-3 和 RP-5 燃油的质量流量。

温度-质量流量特性见图 4,可以得到:常温燃油工况下,RP-3 与 RP-5 燃油的质量流量相差不大,仅在 1%~2%;燃油温度从 0 °C 降至 -15 °C 时,各压力工况下 RP-5 燃油的质量流量比 RP-3 燃油大 2%~4%。根据式(3)可知,相同工况下,喷嘴的喷口面积 A_0 不变,供油压力 Δp 一定时,假设质量流量系数 C_d 不变,质量流量 q_m 由燃油密度 ρ 决定。RP-5 燃油密度 ρ_{RP-5} 大于 RP-3 燃油密度 ρ_{RP-3} ,故 RP-5 燃油质量流量大于 RP-3 燃油质量流量,质量流量的理论差值 Δq_m 见式(4),结合表 1 计算各温度条件下 RP-5 与 RP-3 燃油质量流量的理论差值分别为 2%、2.3%、2.4%,符合试验规律。即:相同供油压力条件下,随着温度降低,燃油密度增加,质量流量增大。

$$q_m = C_d A_0 \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (3)$$

$$\Delta q_m = \frac{\sqrt{\rho_{RP-5}} - \sqrt{\rho_{RP-3}}}{\sqrt{\rho_{RP-3}}} \quad (4)$$

根据试验数据得到各工况下供油压力-质量流量拟合曲线(如图 5 所示)及拟合函数(见表 2),可以看到拟合公式与试验数据的符合性很好,质量流量与供油压力近似满足式(5)函数关系。

—■— RP3, 供油压力为 0.225 MPa —□— RP5, 供油压力为 0.225 MPa
—●— RP3, 供油压力为 0.45 MPa —○— RP5, 供油压力为 0.45 MPa
—▲— RP3, 供油压力为 0.675 MPa —△— RP5, 供油压力为 0.675 MPa

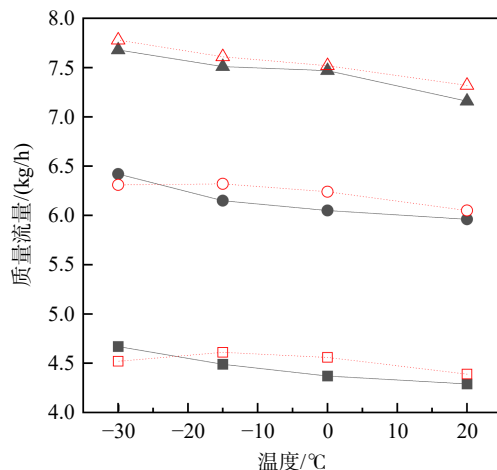


图 4 温度-质量流量特性

Fig. 4 Temperature-mass flow characteristics

$$q_m = a\Delta p^{0.5} \tag{5}$$

燃油温度降至-30 ℃ 时, 在 0.225、0.45 MPa 和 0.675 MPa 供油压力下, RP-5 燃油的质量流量相比 RP-3, 差值分别为-3.2%、-1.7% 和 1.3%, 即: 供油压力在 0.45 MPa 及以下时, RP-5 燃油的质量流量小于 RP-3。由表 1 可知, 相比常温燃油, -30 ℃ 的 RP-3 燃油密度增大 4%, 运动黏度增大 161%,

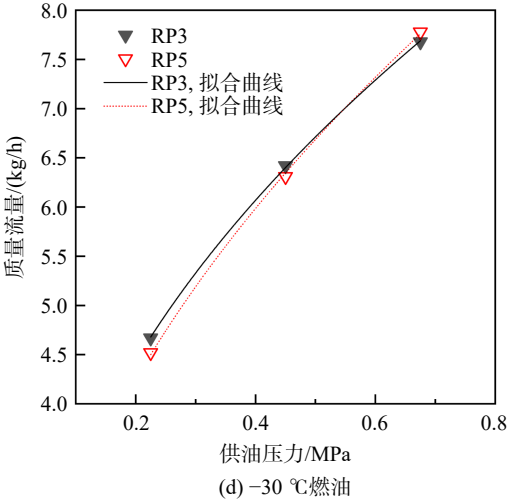
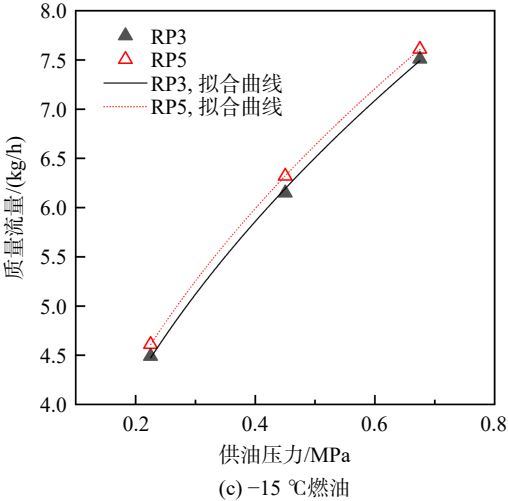
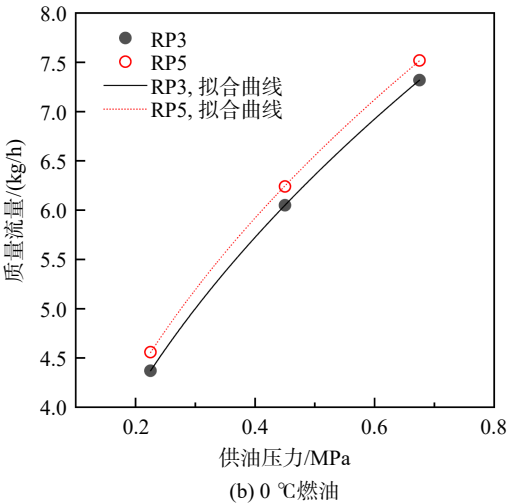
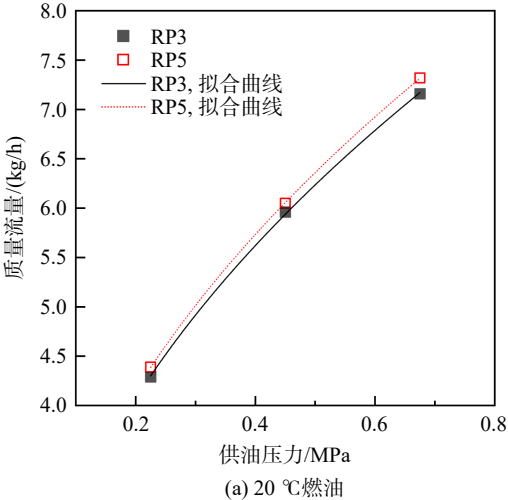


图 5 不同温度下供油压力-质量流量特性及拟合曲线
Fig. 5 Fuel pressure-mass flow characteristics and fitting curve at different temperatures

表 2 拟合函数
Table 2 Fitting function

燃油温度/℃	RP-3	RP-5
20	$q_m=8.61\Delta p^{0.47}$	$q_m=8.78\Delta p^{0.47}$
0	$q_m=8.8\Delta p^{0.47}$	$q_m=8.99\Delta p^{0.46}$
-15	$q_m=9.01\Delta p^{0.47}$	$q_m=9.1\Delta p^{0.46}$
-30	$q_m=9.19\Delta p^{0.45}$	$q_m=9.43\Delta p^{0.5}$

而-30 ℃ 的 RP-5 燃油密度增大 5%, 运动黏度增大 330%, RP-5 燃油运动黏度增幅是 RP-3 的 2 倍。流通面积一定时, 在较小的供油压力下, 温度降低带来的 RP-5 运动黏度大, 导致流阻更大, 故质量流量较 RP-3 燃油偏小; 随着供油压力增大, 提供的动能增加, 克服流阻能力增大, 同时密度的影响比重逐渐提升, 也能遵循相同供油压力条件下, 燃油密度增加, 质量流量增大的规律, 即: 0.675 MPa 供油压力下 RP-5 燃油的质量流量大于 RP-3。

2.2 雾化锥角

在喷嘴进口供油压力为 0.45 MPa 的条件下, RP-3 和 RP-5 燃油的雾化锥角随温度变化的趋势如图 6 所示。试验结果表明, 相同燃油温度条件下, RP-3 和 RP-5 燃油的雾化锥角相差不大, 皆在 4% 以内; 随着温度降低, 雾化锥角明显减小, -30 ℃ 燃油相比常温条件下, RP-3 的雾化锥角减小了 11°, 约为 14%, RP-5 燃油雾化锥角减小了 18.5°(约为 23%)。可见, 燃油降温带来的物性变化显著影响了雾化锥角, 其密度增加导致燃油的惯性增加, 液滴在喷射过程中更难扩散; 而运动黏度增大会

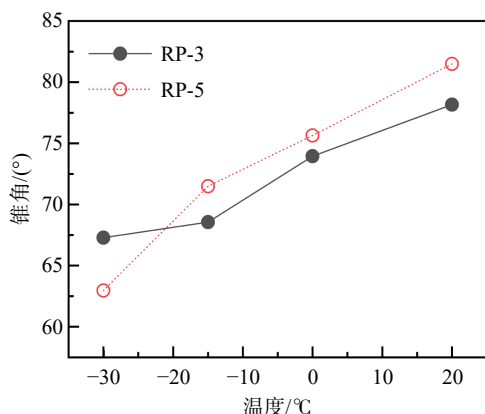


图 6 雾化锥角

Fig. 6 Atomization cone angle

增加燃油的内部摩擦,液滴在喷射过程中更难破碎成小液滴,从而导致雾化锥角减小。RP-5 燃油的物性参数对温度变化更敏感,因此燃油温度降低对 RP-5 雾化锥角的影响更为明显。

2.3 雾化粒度

喷嘴进口供油压力为 0.45 MPa 条件下,RP-3 和 RP-5 燃油的 SMD 随温度变化如图 7 所示。试验结果表明,相同供油压力下,随着燃油温度降低, SMD 增大,雾化质量变差。相同燃油温度条件下, RP-3 燃油的密度、运动黏度和表面张力均小于 RP-5,其 SMD 亦小于 RP-5,偏小 10%~20%,可见其雾化质量略好于 RP-5。燃油温度降至-30 °C 时,RP-3 和 RP-5 燃油的 SMD 相比常温工况分别增大了 48% 和 62%。

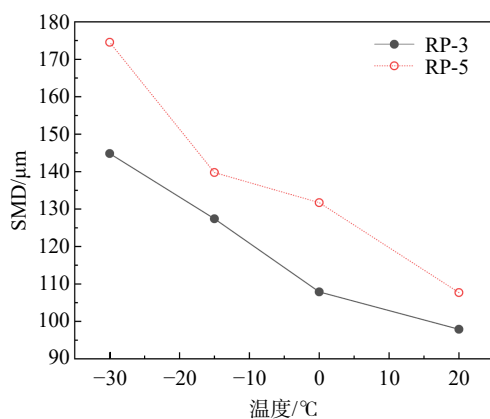


图 7 不同温度下的 SMD

Fig. 7 SMD at different temperatures

PDPA 测试统计结果如图 8 所示,图中颗粒数为半径方向上的所有测点归一化结果。可以得到:燃油温度在-15 °C 及以上时,RP-3 和 RP-5 燃油雾化 SMD 沿半径方向具备“T”形分布规律;RP-3 燃油 SMD 和颗粒数分布变化不明显,RP-3 燃油

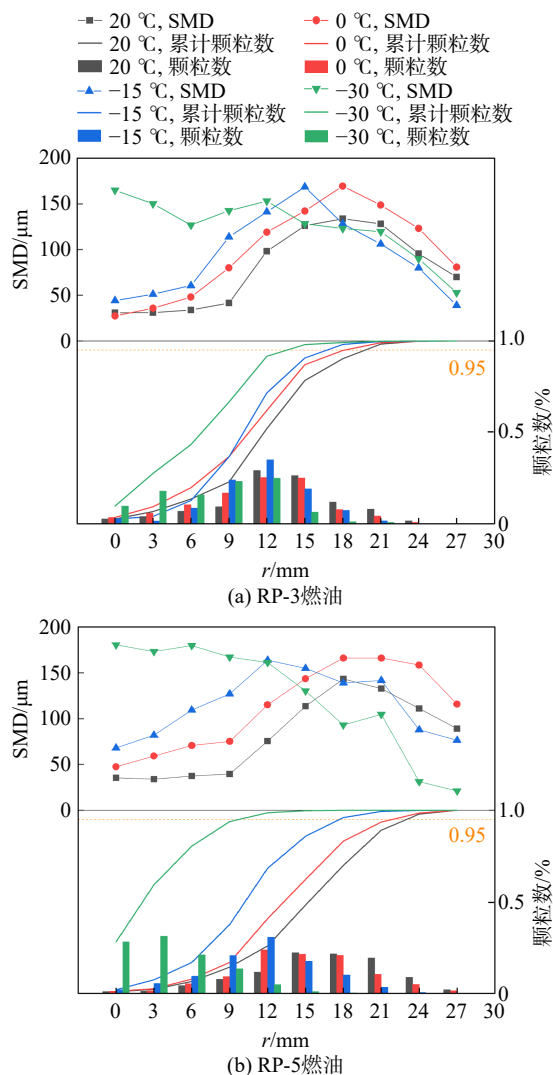


图 8 沿半径方向的 SMD

Fig. 8 SMD along the radius direction

在温度为-15 °C 与 20 °C 时的 SMD 极值差在半径 9 mm 处,相差 48 μm。

随着燃油温度降至-30 °C,雾化质量明显恶化, SMD 增大至 160 μm 以上,在有效的颗粒分布半径范围内呈“一”字规律分布。

从颗粒数沿半径分布来看,RP-3 燃油在-15~20 °C 温度范围内,雾化边界在沿半径方向 21 mm 位置,燃油温度降至-30 °C 时,雾化边界在 18 mm 位置,与雾化锥角测量结果一致。RP-5 燃油从 20 °C 降低至-30 °C,雾化边界逐渐减小,沿半径方向由 27 mm 位置依次减小至 24、21、15 mm 位置。试验结果与雾化锥角测量结果一致。

2.4 雾化均匀度

根据试验数据建立 R-R 分布函数,计算式(2)中的液滴分布指数 n ,结果如图 9 所示。RP-3 燃油分布指数 n 取值为 1.86~2.16,RP-5 燃油分布

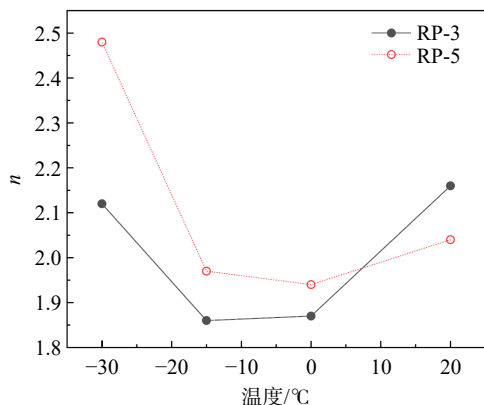


图 9 液滴分布指数

Fig. 9 Droplet distribution index

指数 n 取值为 1.94~2.48, 符合喷嘴雾化的一般规律, 即分布指数 n 一般在 1.8~4 范围内^[22]。随着燃油温度降低, RP-3 和 RP-5 燃油的分布指数 n 均呈现先下降后上升的趋势。

对于常温燃油, RP-3 燃油的分布指数 n 比 RP-5 大 0.12(约为 6%), 其液滴尺寸分布均匀性差别不大; 燃油温度在 0 °C 和 -15 °C 时, RP-3 和 RP-5 燃油的分布指数 n 数值变化不明显, RP-5 燃油的分布指数 n 比 RP-3 大 5% 左右; 燃油温度降至 -30 °C 时, RP-5 燃油的分布指数 n 比 RP-3 大 0.36(约为 17%), 二者比较, 说明 RP-5 燃油的雾化液滴尺寸差别小, 尺寸分布更集中。

3 结 论

不同燃油温度下 RP-3 和 RP-5 的物性参数存在明显差异, 随着温度降低, 燃油密度、运动黏度和表面张力增大。其中 RP-5 燃油的物性参数对温度的变化更敏感, 其质量流量特性和雾化特性变化更明显。主要表现有:

1) 不同温度下的燃油物性对喷嘴质量流量存在影响, 密度越大, 质量流量值越大。随着燃油温度的降低, 燃油密度增加, 燃油质量流量随之增大, RP-5 燃油的质量流量比 RP-3 大 2%~4%。

2) 不同温度下的燃油物性对雾化锥角同样存在影响, 相同压力下, 随着温度降低, 雾化锥角减小。相比 RP-3 燃油, RP-5 燃油在低温下锥角的变化更显著, -30 °C 时 RP-5 燃油的雾化锥角比 RP-3 小 4.5°, 相比常温 RP-5 燃油减小了 23%。

3) 不同温度下 RP-3 和 RP-5 燃油的雾化质量存在差异, RP-5 燃油的 SMD 和液滴分布指数 n 对温度的变化更敏感。相同供油压力下, 随着燃油温度降低至 -30 °C, SMD 增大, 但液滴分布指

数 n 亦增大, 说明尽管温度降低导致了液滴的平均尺寸变大, 但液滴尺寸的不均匀性有所减小, 液滴尺寸分布变得更加集中。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] Lei Zheng, Lu Changbo, An Gaojun, et al. Comparative study on combustion and explosion characteristics of high flash point jet fuel[J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 377-383.
- [3] 胡九生, 赵春光. 军用涡喷涡轮发动机低温起动试验的优化[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(1): 14-19.
Hu Jiusheng, Zhao Chunguang. Optimization of cold start test on military turbojet/turbofan engines[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(1): 14-19. (in Chinese)
- [4] Shin D, Rodrigues N S, Bokhart A J, et al. Spray characteristics of standard and alternative aviation fuels at cold-start conditions[J]. AIAA Journal, 2021, 59(12): 5238-5250.
- [5] 付淑青, 马洪安, 吴宗霖, 等. 低温环境下 RP-3 航空煤油雾化特性试验研究[J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 26-31.
Fu Shuqing, Ma Hongan, Wu Zonglin, et al. Test study on spray characteristics of RP-3 aviation kerosene at low temperature[J]. Aeroengine, 2021, 47(6): 26-31. (in Chinese)
- [6] 宋阁, 赵越, 汪磊, 等. 离轴全息成像测量三维气动旋流低温雾化场[J]. 实验流体力学, 2022, 36(2): 21-29.
Song Ge, Zhao Yue, Wang Lei, et al. Measurement of 3D airblast swirl atomization field at low temperature with off-axis holography[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2022, 36(2): 21-29. (in Chinese)
- [7] 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 on starting performance of a turboshaft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(10): 2029-2035. (in Chinese)
- [8] 王良, 李维, 刘丽娟, 等. RP-3 和 RP-5 燃油对全回流燃烧室点火性能影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 210256.
Wang Liang, Li Wei, Liu Lijuan, et al. Ignition performance of reverse flow combustor using RP-3 and RP-5 jet fuel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 210256. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [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] 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. Effect of kerosene/ethanol blends on spray characteristics of swirling conical liquid sheets[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] Ghose P, Patra J, Datta A, et al. Effect of air flow distribution on soot formation and radiative heat transfer in a model liquid fuel spray combustor firing kerosene[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 74: 143-155.
- [14] Patra J, Ghose P, Datta A, et al. Studies of combustion characteristics of kerosene ethanol blends in an axi-symmetric combustor[J]. *Fuel*, 2015, 144: 205-213.
- [15] 宋澜波. 乙醇混合燃料喷雾特性的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- Song Lanbo. Study on the spray characteristics of ethanol blended fuel[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (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] 刘爱斌, 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)
- [18] 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.
- [19] HB 7667-2000. 航空燃气涡轮发动机燃烧室喷嘴性能试验方法[S].
- [20] 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.
- [21] 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(中国科学院工程热物理研究所), 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)
- [22] 张群, 黄希桥. 航空发动机燃烧学[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [23] 何小民, 张净玉, 李建中. 航空发动机燃烧室原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [24] Lefebvre A H. Atomization and sprays[M]. 2nd ed. New York, US: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

(编辑: 秦理曼)