

RP-3和RP-5燃油对全环回流燃烧室点火性能影响研究^{*}

王 良, 李 维, 刘丽娟, 郭 俊, 江立军, 曹 梁, 郎旭东

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 421000)

摘 要: 为了解RP-3与RP-5燃油对某小型全环回流燃烧室高空点火性能的影响, 在低温低压点火试验器上, 保持燃油温度与进口空气温度相同, 在 -40°C , -30°C , -20°C 和 0°C , 空气压力为44kPa, 54kPa, 62kPa和101kPa条件下, 分别对使用RP-3, RP-5燃油的全环回流燃烧室试验件开展点火试验。结果表明: RP-3燃油在试验的低温、低压条件下可以点火成功, RP-5燃油在温度为 -40°C 的条件下不能点火成功; 燃烧室进口空气参数相同、两种燃油均能成功点火时, RP-5燃油的燃烧室点火边界比RP-3燃油窄20%左右, 且其平均着火时间比RP-3长6.8s, 但从着火成功到全环周向联焰成功的间隔时间比RP-3短2.1s; 随着燃烧室进口温度降低, 两种燃油在相同状态下的点火边界差别逐渐扩大, 燃烧室进口空气压力对点火边界的影响比空气和燃油温度的影响大。

关键词: 航空发动机; 燃油; 回流燃烧室; 高空点火; 试验

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210256-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210256

Ignition Performance of Reverse Flow Combustor Using RP-3 and RP-5 Jet Fuel

WANG Liang, LI Wei, LIU Li-juan, WU Jun, JIANG Li-jun, CAO Liang, LANG Xu-dong

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 421000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of RP-3 and RP-5 fuel on the high altitude ignition performance of a small annular reverse flow combustor, high-altitude ignition experiments were carried out on a low pressure, low temperature ignition test rig. During the experiments, the inlet air temperature were kept the same as the inlet fuel temperature, the inlet temperature states are: -40°C , -30°C , -20°C and 0°C , the inlet air pressure states are: 44kPa, 54kPa and 101kPa. The results show that RP-3 ignited successfully under all the named experiment conditions, while RP-5 cannot be ignited when the temperature drop to -40°C . Under the same combustor inlet conditions and when both fuels can be ignited, the ignition boundary of RP-5 is 20% narrower than the ignition boundary of RP-3, and the kernel formation time is 6.8s longer than that of RP-3, but the light-round-time is 2.1s shorter than that of RP-3. Under the same air pressure and air mass flow rate, as the temperature decreases, the difference of ignition boundary between RP-3 and RP-5 is gradually widened. The influence of combustor inlet air pressure to the ignition boundary is greater than the influence of air temperature and fuel temperature.

Key words: Aero engine; Jet fuel; Reverse flow combustor; High-altitude ignition; Experiments

^{*} 收稿日期: 2021-04-27; 修订日期: 2021-08-08。

通讯作者: 王 良, 硕士, 工程师, 研究领域为航空发动机燃烧室设计。

引用格式: 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):210256. (WANG Liang, LI Wei, LIU Li-juan, 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.)

1 引言

为匹配航空飞行器对于高安全、低危险和高效易燃烧、高热值的燃料需求,国产5号喷气燃料(简称RP-5,GJB560A)已经成为海面舰载或者某些特定使用环境下替代国产3号喷气燃料(简称RP-3,GB6537)的首选^[1]。RP-5燃料具有较高的闪点、较大的密度和与RP-3相近的热值,可以使飞行器的空间较为紧凑,同时降低燃油在运输和存储过程中的危险性^[2],但是其较高的各级馏分回收温度对于发动机的起动特性、燃烧室的燃烧完全度、冒烟积碳等也会造成影响。在点火起动特性方面,发动机通常需要在高空熄火和寒冷状态下成功点火,而燃烧组织设计^[3-6]、点火方式及点火参数^[7]、燃烧室气动流场设计^[8-11]、燃油喷嘴的设计^[10]、进口空气温度压力条件^[11-15]和燃料特性^[2]等都会对燃烧室的点火性能造成影响。

目前主要采用试验的方法开展有关点火过程影响因素的研究,在进口空气条件方面,杨谦等^[11]在常温、低压条件下对两种不同主燃区设计的燃烧室进行高空点火试验,发现进口压力降低时,点火边界油气比先减小后升高。Read^[12]使用多种光学手段测量了进口温度 -8°C ,压力40kPa,燃料Jet-A的温度 15°C ,余气系数2.4情况下某LDI燃烧室火核生成与稳定过程,发现燃油较容易在燃烧室头部中心回流区聚集,且点火受燃烧室气动特性影响较大。Hendershott等^[13]在常压、低温试验器上用光学手段测量了单头部燃烧室使用多种燃料点火过程中,火核生成与稳定阶段的点火特性,发现温度降低时点火成功所需的燃油流量明显增加。

在点火的燃料特性方面,Zheng等^[1]使用定容燃烧器对比分析了RP-3和RP-5的燃烧和爆炸性能,发现RP-5的点火时间较长,但燃烧速度较快、爆炸压力增速较低。任伟等^[2]定性分析了RP-5燃油对发动机正常工作的影响,发现RP-5可提高安全性,但燃料的低温高粘性会导致喷雾性能差,影响燃烧室点火性能。Lefebvre^[14]总结了不同燃料在静止条件下最小点火能量、最小火核直径和点火延迟时间的差别,结果表明高密度、高粘性燃料会恶化点火性能。Pucher等^[15]使用GE公司的J85燃烧室三头部扇形试验件对比了进口温度为 -15°C , -20°C ,压力101kPa,40kPa,燃料温度为 -10°C , -30°C 和 -50°C 时,JP-4和JP-8两种燃料下燃烧室地面和高空点熄火性能,发现JP-8燃料的点、熄火边界均窄于JP-4,且燃

油温度越低点火边界差别越大。Canteenwalla等^[16]在模拟5km高空进气条件下对Jet-A和多种替代燃料的点火过程进行了测量,发现燃料特性对燃烧室点火性能有较大影响。Prieur等^[17]对比了丙烷、正庚烷、十二烷在全环燃烧室中的全环周向联焰时间,发现燃料主要影响雾化蒸发特性,而燃料蒸气越早形成并与空气混合越充分,周向联焰时间越短。陈能坤^[18]使用定容燃烧器对国产五种喷气燃料的点火性能进行研究,发现燃油密度越低、雾化效果越好,点火性能越好。Mayhew等^[19]在进口温度 -30°C ,压力40kPa,燃油温度 -30°C 下对四种不同燃料使用单头部燃烧室进行点火概率测量,结果发现粘性对点火影响较大。Gross等^[20]对比了Jet-A和JP-10燃料的点火特性,发现高进口马赫数,Jet-A燃料在低载荷参数下的点火成功率比JP-10高,而后者在高载荷参数下点火成功率高。Mosbach等^[21]使用Jet-A及7种替代燃料在文献[12]的基础上研究了不同燃烧室的点熄火性能,发现物性相似的燃料对燃烧室火焰稳定性影响较小。

虽然国内外对不同燃料的高空点火性能已经有了一定的研究,但各项研究中燃烧室高空点火的最低空气温度仅到 -30°C ,且部分研究未对燃料降温,燃料主要是与常规煤油相近特性的替代燃料,试验器局限于定容燃烧器、单头部矩形燃烧室或者多头部扇形燃烧室。前人研究结果可以揭示燃料对火核形成的影响,但是并不能描述燃料对点火特性和全环火焰传播特性的影响,文献[7]虽然研究了全环燃烧室火焰传播特性,但局限于地面及常温状态点火,并不能反映低温低压环境下的点火情况。本文在低温、低压燃烧室试验器中,对小型全环回流燃烧室试验件开展RP-3和RP-5燃油的高空点火试验,对比分析两种燃料对全环燃烧室在低温低压下的点火性能以及点火时间的影响。

2 方法

2.1 研究对象

本文的研究对象为小型全环旋流杯回流燃烧室,使用离心喷嘴、双级涡流器雾化燃油和形成部分预混的油气混合物,其中双级涡流器的旋向相反,旋流杯全环燃烧室的剖面结构及内部流动示意图如图1。点火时燃油在离心喷嘴进出口两端压差作用下向火焰筒内喷出,形成空心油锥,油锥贴近文氏管内表面形成油膜,在双级旋流器反向气流剪切作用下进一步破碎、雾化,雾化后的燃油液滴随气流运动到

点火电嘴附近在火花能量作用下吸热、蒸发、与空气混合、着火并稳定火焰,最终实现点火。

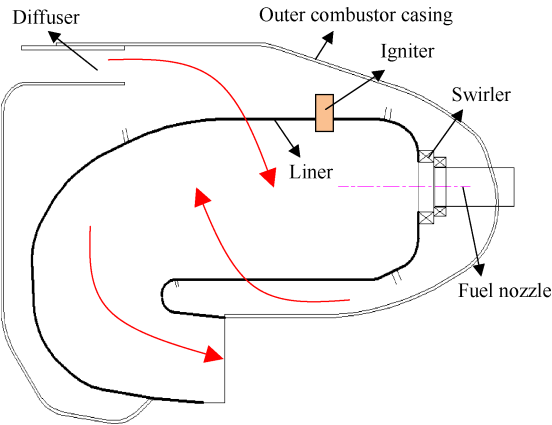


Fig. 1 Schematic of a reverse flow combustor

2.2 试验系统和方法

试验系统主要包括燃烧室低温低压试验仓、低温进气装置、燃油冷却装置、点火系统和数据采集系统等,结构示意图如图2。其中点火系统中点火电嘴的火花能量0.9J,火花频率(2~5)Hz,火花直径5mm。

试验前检测表明试验设备和仪器仪表均在有效期内且工作正常,预先把燃油冷却,直至燃油温度与进气温度相同,然后再调节燃烧室进口空气流量、压力进行点火试验。试验时,点火电嘴先工作再供油,同时监测燃烧室出口温度,若点火成功,则逐步降低油量继续试验,否则增加油量继续试验。首次供油的燃油流量根据经验选择,在点火边界附近,至少进行三次试验。为了避免试验器发生烧蚀,点火过程中需控制点火供油流量的最大值低于对应燃烧室进气条件下燃烧室油气比为0.054的流量。

2.3 测量方法

燃烧室进口空气流量用标准流量喷嘴测量,燃油流量用质量流量计测量,进出口空气压力分别采用全环均布3支、每支上等环面均布的2个总压管测量,进出口静压采用静压孔测量,进出口空气温度采

用热电偶测量,温度测量探针的数量分别为3支,进口每支等环面均布2个热电偶测点,出口每支等环面均布5个热电偶测点。点火试验的总静压测量方案和试验系统示意如图3所示,其中热电偶测点从探针伸出呈耙状。

燃烧室点火过程分为火核形成、火焰稳定和火焰传播三个阶段^[14],由于本文研究的全环燃烧室出口测量段中布置有3支温度探针,因此从燃烧室供油开始,若出口三支温度探针中任意一支探测有温升,即为着火成功,从供油开始到着火成功截止的间隔时间为着火成功时间(Kernel Forming Time),着火成功包含火核形成与火焰稳定两个阶段;着火成功后再间隔一段时间,若每支温度探针均有温升且温度均大于250℃即为全环周向联焰成功(即火焰传播成功),从着火成功开始到周向联焰成功截止的间隔时间称为周向联焰时间(Light-Round-Time)^[7];从燃烧室供油开始到周向联焰成功截止的时间称为联焰时间^[14]。

点火试验结果的误差主要来源于测量误差和参数的调节误差,其中燃油质量流量计测量误差为±0.5%,变频电机的油量调节误差为±0.5%,进气流量的测量误差±1%,电磁阀空气流量的调节误差±0.5%,流量计标定和流量读数的误差均为±0.1%。根据误差传播理论^[22],点火油气比的测量误差计算公式如下

$$\frac{\Delta f}{f} = \left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} \right)_{\text{fuel}} + \left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} \right)_{\text{gas}} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} \right)_{\text{flowmeter}} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} \right)_{\text{gas valve}} + \left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} \right)_{\text{calib.}} + \left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} \right)_{\text{read}} \tag{1}$$

根据式(1)最终求得点火试验油气比的测量误差为2.2%,在一般工程要求的误差范围(≤5%)内。

2.4 试验内容

试验内容为RP-3燃油和RP-5燃油在不同状态下的高空点火试验。表1为文献[1-2]测得的两种燃油主要物性参数对比,其中表面张力为文献[14]的研究结果。

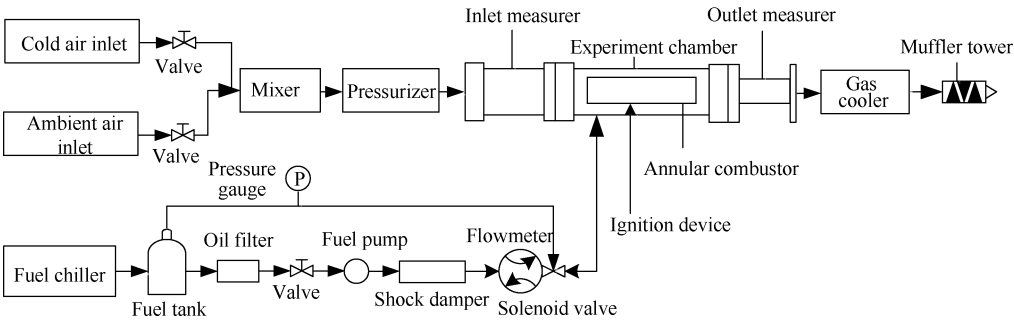


Fig. 2 Low temperature low pressure combustor ignition test rig

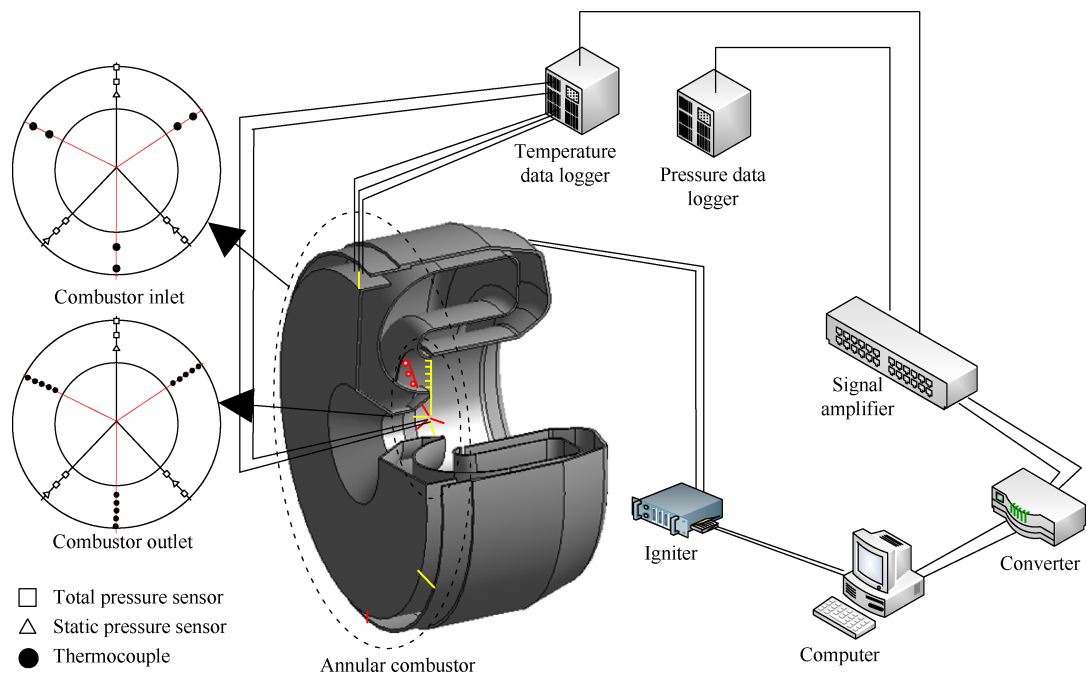


Fig. 3 Schematic of ignition experiment testing system

Table 1 Thermal property of two different fuels^[1-2,14]

Parameter	Parameter value	
	RP-3	RP-5
Gross calorific value/(MJ/kg)	43.07	42.95
Density(20℃)/(kg/m ³)	790.3	815.0
Viscosity(20℃)/(mm ² /s)	1.79	5.87
Viscosity(-40℃)/(mm ² /s)	5.84	11.30
Flash point/℃	45.00	74.00
Surface tension(20℃)/(N/m)	0.0228	0.0237
Surface tension(-40℃)/(N/m)	0.0278	0.0288

试验时燃烧室点火的燃油温度与燃烧室进口空气温度相同,具体的试验参数如表 2 所示,其中详细的进口流量参数用进口换算参考速度($v_{r,c}$)表示,其单位为 m/s,换算参考速度考虑了燃烧室进口气流的压力、温度对参考速度的影响,计算公式如下

$$v_{r,c} = \left(\dot{m}_{a3} p_{i3} T_{i3} \right) / \left(\rho_3 A_r p_0 T_0 \right) \quad (2)$$

式中 $\dot{m}_{a3}$ 为燃烧室进口空气流量, kg/s; p_{i3} 为燃烧室进口空气总压, kPa; T_{i3} 为燃烧室进口空气总温, °C; A_r 为燃烧室参考截面面积, m²; $p_0=101$ kPa, $T_0=15$ °C。

Table 2 Combustor inlet air parameters

State	$v_{r,c}$ /(m/s)	T_{i3} /°C	p_{i3} /kPa
1	1.5~2.5	-40, 0	101
2	1.0~1.2	-40, -20	62
3	0.9~1.2	-40, -30, -20	54
4	0.6~1.2	-40	44
5	0.8~1.1	0	44

对于每个试验状态,根据经验预估初始的燃油流量,开始点火。在点火边界附近减少或者增加燃油,至少进行三次试验。

3 结果与讨论

3.1 点火试验结果

在表 2 所述各个状态下,分别进行使用 RP-3 燃油和 RP-5 燃油的燃烧室高空点火试验,试验结果如表 3 所示。可以看出:(1)燃烧室进口空气温度为 -40℃时,使用 RP-3 燃油的燃烧室可以成功点火,而在最高油气比为 0.068 情况下,使用 RP-5 燃油依旧点火不成功。由于燃烧室、点火方式均未发生改变,RP-5 燃油无法点火成功可能是因为低温、低压条件下 RP-5 燃油的粘性和表面张力较大,雾化效果较差、油气混合难度高;(2)当燃烧室的进口空气温度高于 -40℃时,RP-3 燃油和 RP-5 燃油均可点火成功。这可能是因为较高的温度下,RP-3 燃油和 RP-5 的燃油粘度和表面张力总体上差别较小,在离心喷嘴较高的压差作用下,两种燃油都可以较好雾化,而温度较高时燃油着火所需的能量减少,燃烧室的总体气动特性、点火器工作参数及点火条件等设计参数均未发生改变,两种燃油的热值基本相当,因此温度较高时采用两种燃油的燃烧室均能成功点火。在 -40℃下使用 RP-5 燃油的燃烧室点火不成功,因此下文仅针对进口空气和燃油温度为 -30℃, -20℃和 0℃的状态进行分析。

Table 3 Ignition results under different inlet air states			
State	$T_{13}/^{\circ}\text{C}$	RP-3	RP-5
1	-40	√	×
	0	√	√
2	-40	√	×
	-20	√	√
3	-40	√	×
	-30	√	√
	-20	√	√
4	-40	√	×
5	0	√	√

Notes: “√” means combustor ignited successfully; “×” means combustor cannot be ignited.

3.2 点火边界对比

图 4 是采用 RP-3 和 RP-5 燃油时,燃烧室在不同温度和压力下点火边界曲线对比,图中用换算参考速度 $v_{r,c}$ 把进口流量、压力和温度归一化。可见分别采用两种燃油进行点火试验,当进口气流换算速度较小时,点火油气比边界随换算速度变化较快,而进口气流换算速度较大时,点火油气比边界随换算速度变化较慢,符合幂函数变化规律。采用幂函数对两种燃油点火边界试验结果进行拟合,得到 RP-3 和 RP-5 燃油的点火油气比边界拟合关系式分别如下(其中 RP-3 燃油点火边界的拟合误差 $R^2=0.920$,RP-5 燃油的点火边界拟合误差 $R^2=0.914$)

$$FAR_{RP-3} = 0.0345 \cdot (v_{r,c})^{-0.978} \tag{3}$$

$$FAR_{RP-5} = 0.0421 \cdot (v_{r,c})^{-0.996} \tag{4}$$

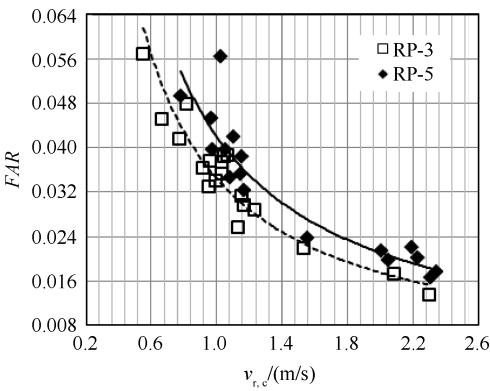


Fig. 4 Ignition boundary of combustor using RP-3 and RP-5

综上所述可以看出:

(1)使用 RP-3 燃油的回流燃烧室高空点火边界比使用 RP-5 燃油的燃烧室点火边界宽。相同状态下 RP-3 燃烧室点火边界的油气比在 0.0135~0.056,而 RP-5 燃烧室点火边界油气比在 0.0165~0.056,RP-3 的边界比 RP-5 宽 20% 左右。这说明相同情况下

RP-3 燃油的点火性能较好。这一方面可能是因为 RP-5 燃油粘度较高、密度较大、雾化较困难;另一方面可能是因为 RP-5 燃油闪点较高、挥发性较差、蒸汽压力较低,点火过程中燃油蒸汽难以生成,相同情况下需要较多的燃油才能形成可燃油气混合物。在燃油雾化特性方面,文献[14]给出了离心喷嘴雾化粒径经验公式

$$SMD/N = 4.4 \cdot \sigma_f^{0.6} \mu_f^{0.16} \rho_f^{-0.16} \tag{5}$$

式中 σ_f 为燃油表面张力, N/m; μ_f 为燃油运动粘度, kg/(m·s); ρ_f 为燃油密度, kg/m³。N 为喷嘴的工况参数, $N = W_f^{0.22} \Delta p_f^{-0.43}$ 。式中 W_f 为喷嘴流量, kg/s; Δp_f 为燃油喷嘴的供油压差, MPa。

由上式得 RP-3 和 RP-5 燃油在 20℃ 时的雾化粒径 SMD/N 分别为 (0.165, 0.205); 在 -40℃ 时的雾化粒径 SMD/N 分别为 (0.225, 0.256)。可见在相同条件下 RP-3 燃油的雾化粒度比 RP-5 燃油小,而较小的雾化粒径可能使燃油蒸发、油气混合较充分,从而使 RP-3 燃油燃烧室点火边界比 RP-5 燃料燃烧室点火边界宽。

(2)在换算参考速度较小时点火边界的油气比随换算参考速度增大而下降较快,当换算参考速度较大时,点火边界的油气比随参考速度的变化减小,这是因为换算参考速度较小对应较低的气流温度、压力和燃油温度,而低温低压工况下,燃烧室头部降压、燃油的粘性和表面张力对雾化具有决定作用,燃油雾化特性变差,油气混合的难度提高,使得点火边界上油气比较高。

(3)RP-3 和 RP-5 燃油的点火边界曲线在参考速度较低时差别较大,随着换算参考速度的升高,两条曲线的差别逐渐减小,当换算参考速度大于 2.5m/s 后,两条曲线呈现重合的趋势,这是因为较大的换算参考速度对应较大的空气流量或者较高的空气压力和温度,当空气流量较高时,燃油在较高速度气流的作用下破碎和雾化情况较好,油气混合也更容易、更快,燃油粘性、饱和蒸气压等物性参数对点火过程的影响减弱。

图 5 是采用不同燃油测得的燃烧室点火边界燃油流量对比,图中纵坐标 W_f 为点火边界燃油流量, W_{f0} 为参考燃油流量。由图可知:(1)采用 RP-3 燃油时燃烧室在不同状态点火边界上的油量总体上比采用 RP-5 燃油的燃烧室少,这可能与 RP-5 较高的闪点和较大的粘性有关;(2)采用 RP-3 燃油时燃烧室点火边界油量在 0.62~1.14,而采用 RP-5 燃油时燃烧室点火边界上的油量在 0.78~1.49,可见 RP-5 燃油的点火

边界油量随进口参数变化较大;(3)RP-3燃油点火成功的平均油量约为0.91,而RP-5燃油点火成功的平均油量为1.05,说明在相同进气条件下若要使用RP-5燃油的燃烧室也能成功点火,点火状态下的供油流量应比RP-3增加15.4%左右。

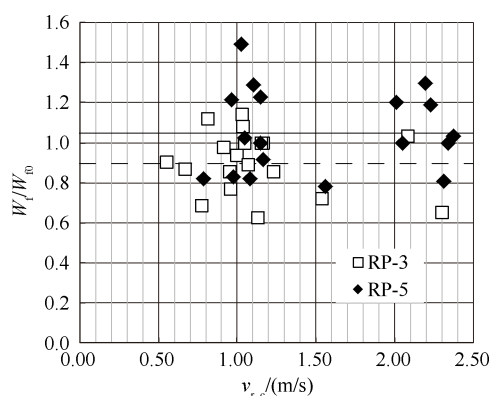


Fig. 5 Non-dimensional ignition fuel mass flow rate of RP-3 and RP-5

3.3 点火时间对比

图6是RP-3和RP-5燃油在点火边界上着火时间对比,图7是两种燃油在点火边界上周向联焰时间对比。可以看出:(1)使用RP-5燃油的着火成功时间总体上比RP-3燃油长,在不同进气条件下,RP-3燃油的着火成功时间在1~9s而RP-5燃油的着火成功时间在2~15s,平均着火时间增长6.8s;(2)使用RP-5燃油的燃烧室周向联焰时间总体上比使用RP-3燃油的燃烧室短,不同进气条件下使用RP-3的燃烧室周向联焰时间在0.7~15.5s,而使用RP-5的燃烧室周向联焰时间在0.8~7.5s,平均周向联焰时间缩短2.1s;(3)不同进气条件下,采用RP-5燃油的燃烧室周向联焰时间受进气条件的影响小于使用RP-3燃油的燃烧室,这可能是因为RP-3燃油点火所需燃油流量较少、着火时间短,周向联焰时未被点燃的燃油量少,且燃油分布受气流影响较大,难以实现各处快速点火。结合文献[1]对RP-3燃油和RP-5燃油的燃速测量结果可知,RP-5燃油的燃烧速度比RP-3快,而较快的燃烧速度会缩短燃烧所需的时间,使得火焰传播的速率变快,从而缩短燃烧室周向联焰时间、降低进口气流参数对周向联焰时间的影响。

为了在相同油气比下对比RP-3和RP-5燃油周向联焰时间的差别,对表2中部分典型高空点火状态,给出两种燃油在点火边界上的周向联焰时间随燃烧室油气比的变化,如图8所示。可以看出:(1)在

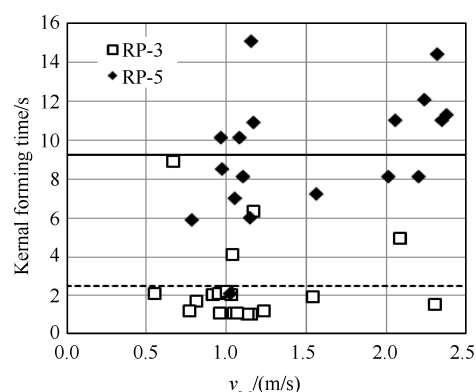


Fig. 6 Kernel forming time on the ignition boundary of combustor using RP-3 and RP-5

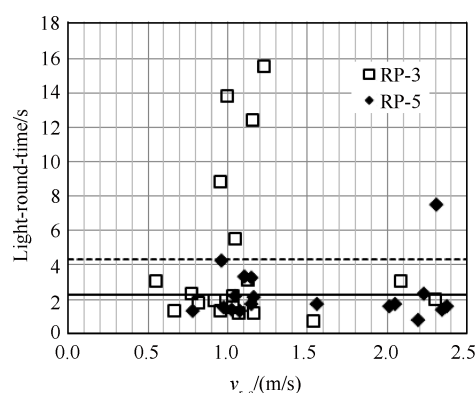


Fig. 7 Combustor light-round-time on the ignition boundary of combustor using RP-3 and RP-5

不同状态下使用RP-5燃油的燃烧室点火边界上油气比整体上高于RP-3燃油的点火油气比,说明RP-3燃油点火较容易;(2)在相同的油气比下,采用RP-5燃油的燃烧室周向联焰时间比RP-3短,在不同温度情况下周向联焰时间的差别也相对较小,结合文献[1]中RP-5燃烧速率比RP-3高的研究结果知,采用RP-5燃油的燃烧室火焰沿周向传播的速度可能更快;(3)相同空气压力下,空气和燃油温度越低,燃烧室点火边界油气比越高,这可能是因为进气温度低使得燃油蒸发困难,油气混合物难以形成;(4)相同空气压力下,空气和燃油的温度由-20℃降低到-30℃时,RP-3燃油在点火边界上的周向联焰时间明显延长而RP-5燃油的周向联焰时间基本保持2~4s不变,说明使用RP-3燃油的燃烧室火焰沿周向传播的过程中受温度影响较大。

3.4 气流参数的影响

图9是在表2中部分典型的燃烧室点火状态下,RP-3燃油、RP-5燃油的燃烧室点火边界对比,可以看出:(1)当燃烧室进口空气和燃油的温度均为0℃时,RP-3和RP-5燃油的点火边界差别较小,当换算

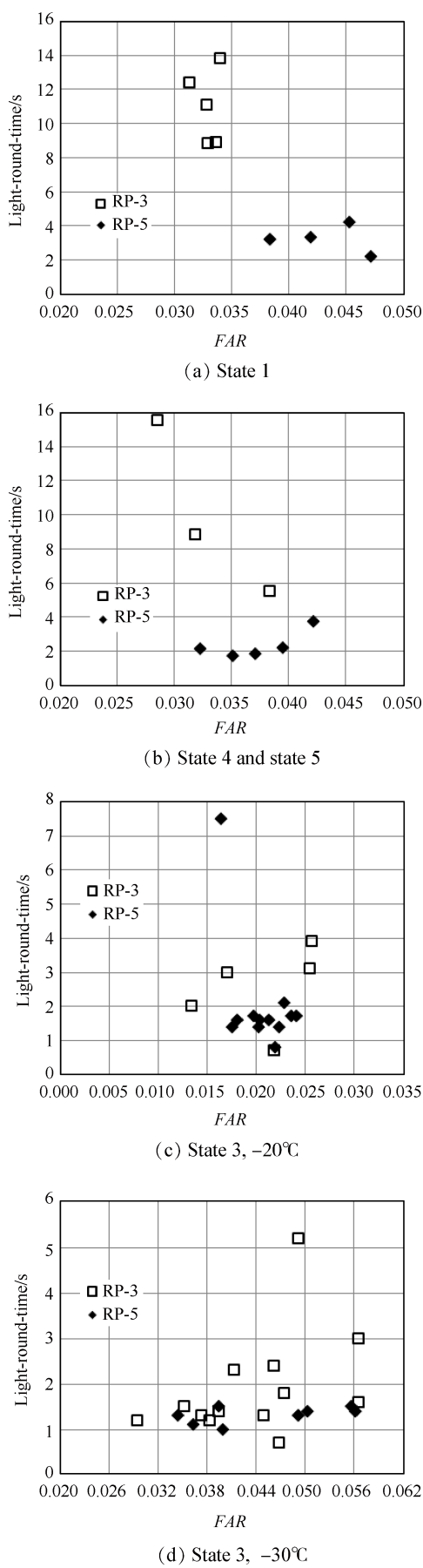


Fig. 8 Effects of FAR on combustor light-round-time of RP-3 and RP-5

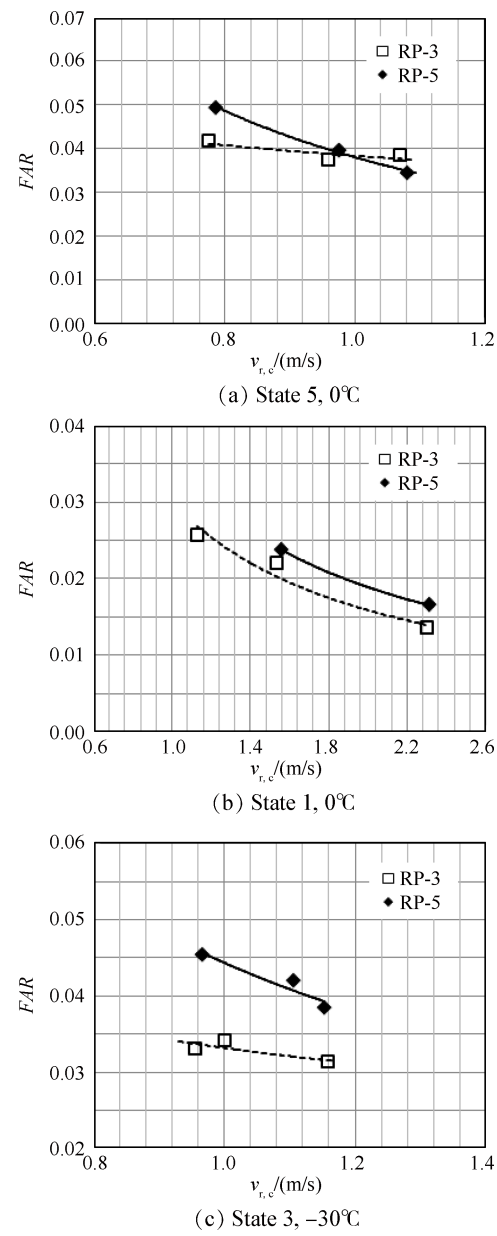


Fig. 9 Ignition boundary of combustor using RP-3 and RP-5 at different combustor inlet air conditions

参考速度较大时,使用 RP-5 燃油的燃烧室点火边界上的油气比比 RP-3 燃油低,说明此时燃油物性对燃烧室点火性能的影响较小;(2)随着温度降低,RP-3 和 RP-5 燃油点火边界之间的差别逐渐变大,这可能是因为 RP-5 燃油的粘度随温度降低增高较快,而高粘度燃油的雾化效果比低粘度燃油的雾化效果差,而且 RP-5 燃油的闪点较高,在低温下形成油气混合物的难度也较高;(3)随着进口空气压力降低,点火边界上的油气比逐渐升高,其中 RP-3 的点火边界油气比随压力降低均匀增大,RP-5 的点火边界油气比也随压力降低而增大,但当进口空气压力降低到 54kPa(状态 3,约 4km 高空)后点火油气比边界基本

保持在 0.04~0.05 不变;(4)与点火高度相比,点火油气比边界受温度的影响相对较小,说明在空气和燃油温度、进口空气压力三个参数中,空气压力对点火边界的影响较大。这可能是因为常规燃烧室点火器能量较高,相同进气压力下温度降低时,点火器对油气混合物补充的能量可以在一定程度上弥补温度降低对点火的影响;而进气压力降低时,气流速度降低,对与点火直接相关的油气混合速率、回流涡稳定性等燃烧室气动特性影响较大,因此点火性能变化较大。

4 结 论

本文对某小型全环回流燃烧室使用 RP-3 和 RP-5 燃油时的模拟高空点火性能进行了研究,可以得到以下一些结论:

(1)采用 RP-5 燃油的燃烧室的高空点火性能比 RP-3 燃油差,当燃烧室的进口空气温度和燃油的温度下降至 -40°C 时,在燃烧室油气比为 0.025~0.054 内增加燃油,不能使燃烧室点火成功。

(2)当燃烧室的进口空气和燃油的温度高于 -40°C 时,使用 RP-5 燃油的燃烧室点火边界比使用 RP-3 燃油的燃烧室点火边界窄 20% 左右。

(3)RP-5 燃油在相同条件下的着火成功时间比 RP-3 燃油长,但着火后到联焰成功的间隔时间(周向联焰时间)较短。

(4)进口空气压力对点火边界的影响比温度对点火边界的影响大,当点火高度升高到 4km(压力下降至 54kPa)后,RP-5 的点火油气比变化较小而 RP-3 的点火油气比仍在均匀增大。

(5)燃烧室进口空气温度和燃油的温度越低,使用 RP-3 燃油和 RP-5 燃油的燃烧室点火边界的差别越大。

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] 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.
- [3] Mongia H C, Al-Roub M, Danis A, et al. Swirl Cup Modeling Part I[R]. *AIAA* 2001-3576.
- [4] 罗国良,宋双文,胡好生,等. 旋流杯空气雾化喷嘴套筒出口形状对小型燃烧室点火性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(8): 1708-1712.
- [5] 王晓峰,林宇震,张 弛. 主燃孔位置对于燃烧室气动力学及点火熄火性能的影响研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(9): 2020-2028. (WANG Xiao-feng, LIN Yu-zhen, ZHANG Chi. Effects of Primary Jet Position on Combustor Aerodynamic Characteristics and Ignition/LBO Performance[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(9): 2020-2028.)
- [6] 康 尧,林宇震,蒋 尧,等. 双级旋流杯结构变化对点火特性的影响研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(5): 675-680. (KANG Yao, LIN Yu-zhen, JIANG Yao, et al. Effects of Sleeve Mixing Length of Swirl Cup on the Ignition Characteristics[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(5): 675-680.)
- [7] 王高峰,夏一帆,叶沉然,等. 环形燃烧室周向点火机理基础研究进展[J]. *实验流体力学*, 2019, 33(1): 14-28.
- [8] 薛 鑫,林宇震,张 弛,等. 火焰筒压力损失对点火特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(10): 2229-2235.
- [9] 代 威,林宇震,张 弛. 第 2 级径向旋流器旋流数对燃烧室点火和贫油熄火性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(5): 1093-1098.
- [10] 陈 坚,李建中,袁 丽,等. 雾化特性对喷雾燃烧点火过程的影响[J]. *推进技术*, 2017, 38(6): 1318-1326. (CHEN Jian, LI Jian-zhong, YUAN Li, et al. Effects of Spray Characteristics on Ignition Process in Spray Combustion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1318-1326.)
- [11] 杨 谦,林宇震,代 威,等. 主燃孔轴向位置对低压点火性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(5): 1057-1066.
- [12] Read R W. Experimental Investigations into High-Altitude Ignition of a Gas Turbine[D]. *England: University of Cambridge*, 2008.
- [13] Hendershott T, Stouffer S, Monfort J. et al. Ignition of Conventional and Alternative Fuel at Low Temperatures in a Single-Cup Swirl-Stabilized Combustor[R]. *AIAA* 2018-1422.
- [14] Lefebvre A H. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions[M]. *US: Hemisphere Publishing Corporation*, 1983.
- [15] Pucher G, Allan W D. Turbine Fuel Ignition and Combustion Facility for Extremely Low Temperature Conditions[R]. *ASME GT* 2004-53620.

- [16] Canteenwalla P, Chishty W A. Investigation of Engine Performance at Altitude Using Selected Alternative Fuels for the National Jet Fuels Combustion Program[R]. *AIAA* 2017-0150.
- [17] Prieur K, Durox D, Beaunier J, et al. Ignition Dynamics in an Annular Combustor for Liquid Spray and Premixed Gaseous Injection[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3717-3724.
- [18] 陈能坤. 国产五种不同性质喷气燃料的高空点火性能研究[J]. 推进技术, 1987, 8(6): 44-50. (CHEN Ning-kun. High Altitude Ignition Research of Five Kinds of Chinese Jet Fuels with Different Property[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1987, 8(6): 44-50.)
- [19] Mayhew E, Mitsingas C M, Coburn V D, et al. Ignition of Conventional and Alternative Jet Fuels at Altitude Conditions[R]. *AIAA* 2020-0641.
- [20] Gross J T, Neuroth C, Huelskamp B C, et al. Comparing Jet-A and JP-10 Ignition Performance in a Swirl-Stabilized Combustor at High Mach Conditions[R]. *ASME GT* 2018-75570.
- [21] Mosbach T, Gebel G C, Clercq P L. Investigation of GTL-Like Jet Fuel Composition on GT Engine Altitude Ignition and Combustion Performance: Part II: Detailed Diagnostics[R]. *ASME GT* 2011-45510.
- [22] 周秀银. 误差理论与实验数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1986.

(编辑:梅 瑛)