

替代燃料贫油熄火边界影响因素

周文杰, 张捷, 杨晓奕
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了研究燃油以及入口空气压力对于贫油熄火(LBO)边界的影响大小及规律,采用航空煤油(RP-3)、高沸点费托油(FT)和柴油进行了三种不同燃烧室入口压力工况下的贫油熄火实验并进行规律分析。分析结果表明:入口压力对贫油熄火边界的影响(19.17%)要大于燃油性质造成的影响(6.26%)。导致熄火油气比变化的主要因素包括入口空气压力,火焰体积,燃烧室温度,燃油雾化直径以及燃油的热值和密度,其中火焰体积和燃油雾化直径主要受燃油性质影响,而燃烧室温度则与入口压力有很大关系。入口压力影响的贫油熄火油气比变化会受其影响的火焰体积和燃烧室温度变化而削弱。碳数高支链烷烃含量少的燃油可能会提高火焰体积对熄火油气比的影响,使其在低入口压力下有更好的贫油熄火边界。

关 键 词: 贫油熄火; 替代燃料; 燃油组分; 火焰体积; 燃烧室

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Influencing factors of the lean blowout of alternative fuels
ZHOU Wenjie, ZHANG Jie, YANG Xiaoyi
(School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to research the effect of fuel and inlet air pressure on the lean blow-out (LBO), the experiment using standard kerosene fuel (RP-3), diesel and high boiling Fischer-Tropsch oil (FT) in three different combustor inlet pressures was conducted. The results showed that the influence of inlet pressure (19.17%) on LBO was greater than the effect of fuel (6.26%). The main factors of LBO include inlet air pressure, flame volume, combustion temperature, the fuel atomization diameter and the LHV and density of fuel. The flame volume and fuel atomization diameter were mainly affected by the fuel property while the combustion temperature was mainly influenced by the inlet pressure. The change of LBO affected by inlet pressure was attenuated by the affected flame volume and combustion temperature. Fuels with low carbon number and high alkane content may increase the effect of flame volume on LBO, and result in a better LBO in low inlet pressure.

Key words: lean blowout; alternative fuel; fuel composition; flame volume; combustor

收稿日期:2018-09-28
基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0120100)
作者简介:周文杰(1993—),男,硕士生,主要从事替代燃油性能评价。E-mail:2860275457@qq.com
通讯作者:杨晓奕(1968—),女,教授、博士生导师,博士,主要研究方向为航空替代燃料制备及性能。
E-mail:yangxiaoyi@buaa.edu.cn

引用格式:周文杰,张捷,杨晓奕. 替代燃料贫油熄火边界影响因素[J]. 航空动力学报,2019,34(7):1501-1509. ZHOU Wenjie, ZHANG Jie, YANG Xiaoyi. Influencing factors of the lean blowout of alternative fuels[J]. Journal of Aerospace Power, 2019,34(7):1501-1509.

燃油熄火边界是评价航空发动机燃烧室性能优劣的重要指标,其直接影响发动机工况范围以及地面点火和高空再点火性能。随着环境问题的出现,民航组织^[1]对航空发动机氮氧化物排放进行了严格的限制,并制定了温室气体减排目标。以上措施促使绿色替代燃油以及低污染燃烧室的加速发展。由于绿色替代燃油与石油基航油组分差异将导致贫油熄火边界的偏移,而在靠近贫油熄火边界燃烧又可以降低氮氧化物排放,因此替代燃油对贫油熄火边界的影响将直接影响燃烧室的燃烧稳定性。

20世纪50年代学者们开始对燃烧室的贫油熄火边界进行研究。其中 Longwell 等^[2-3]于1953年提出的均匀搅拌器模型,认为燃烧室发生熄火的原因是燃油产生的热量不足以给新鲜混合燃气提供点燃所需的能量。1979年 Lefebvre、Ballal^[4-5]在均匀搅拌器模型上提出熄火预测半经验公式——Lefebvre 公式,定量给出了熄火边界与燃烧室结构,工况以及燃料性能的关联关系,得到广泛的应用。1983年,Leonard 等^[6]提出了特征时间法预测模型,采用燃油液滴蒸发时间,燃烧反应时间以及燃油在燃烧室存留时间三个特征时间来预测贫油熄火边界,认为当燃油在燃烧室中存留时间小于燃烧反应时间加上液滴蒸发时间时就会发生熄火。2000年,Ateshkadi 等^[7]考虑燃烧室入口的旋流器的影响对 Lefebvre 公式进行了改进,修改了其中的结构系数项,使其可以体现旋流器叶片角度旋流方向等因素对熄火边界的影响。2010年,Xie 等^[8]对 Lefebvre 公式中的结构项进行了进一步的改进,其认为在燃烧室中发生燃烧反应的气流仅为总来流气体的一部分且将燃烧区域修正为火焰体积,建立了 flame volume (FV)模型公式,提高了预测精度。

随着数值模拟技术的发展,贫油熄火油气比预测方法随之更加丰富。1991年 Rizk 和 Mogia 等^[9-10]将半经验公式和数值模拟方法结合提出了多维经验分析法,不过该方法存在着由半经验公式导致的局限性。2004年,张宝诚等^[11]通过计算燃烧室的冷态流场分布,取特征节点速度,以节点速度与火焰吹熄速度对比来预测贫油熄火边界,该方法主要难点在于如何选择能代表熄火的特征节点。2011年,Wang 等^[12]通过数值模拟冷态燃烧室获得流场参数,通过计算每个网格节点的 Da 数(化学反应时间尺度与流动时间尺度的比值),以全局 Da 数组成的图像代表火焰结构变化来预

测贫油熄火,该方法可以较为准确的模拟燃烧室火焰结构,但其熄火判断准则缺乏合适的理论支持。2010年,蔡文祥等^[13]和2014年,张智博等^[14-15]则通过数值模拟燃烧室实际燃烧状态,通过获取燃烧室特征点或者特征面上的温度变化来预测贫油熄火边界,该方法的准确性极大地受到燃烧模型本身准确性的限制,同时特征点和特征面也较难选取。

贫油熄火边界的实验和数值模拟预测方法多集中于燃烧室结构以及工况的影响,对于燃油对贫油熄火油气比的影响研究较少。本文就此问题开展实验研究,通过分析三种组分差异较大的燃油在不同工况下贫油熄火油气比的变化,以探究燃油性质以及工况对贫油熄火的影响及规律。

1 贫油熄火及燃油性质实验

1.1 贫油熄火实验

本实验采用航空煤油 RP-3,柴油和高沸点费托油(馏程 260~300℃费托合成油),设定入口压力(表压)为 140、190、220 kPa,入口空气流量维持在 500 g/s 左右,入口空气温度为 30℃(有一定波动,与环境有关),燃油入口温度为 15℃左右。试验台的实物图如图 1 所示,其采用单头部矩形可视化模型燃烧室(1/18 环形燃烧室),配备双径向旋流器(如图 2 所示)和离心喷嘴,燃烧室侧面设有石英观察窗可观察火焰形状及燃烧状态,实验全程采用计算机控制传感器进行数据采样,通过压力传感器获得燃烧室出入口压力及燃油压力, K 型热电偶获得燃烧室的温度,涡街流量计可获得空气流量,而燃油流量则通过燃油出入口压力差结合伯努利方程计算获得,数据采样频率为 100 Hz,详细实验结构可参考文献[16-19]。

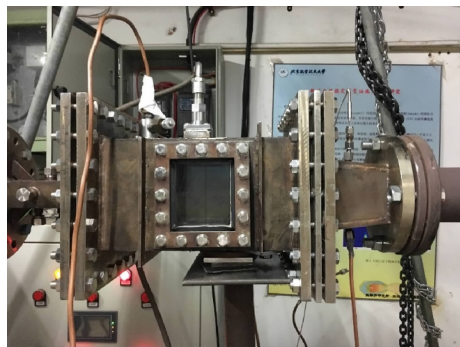


图1 燃烧室实物图

Fig. 1 Combustor chamber

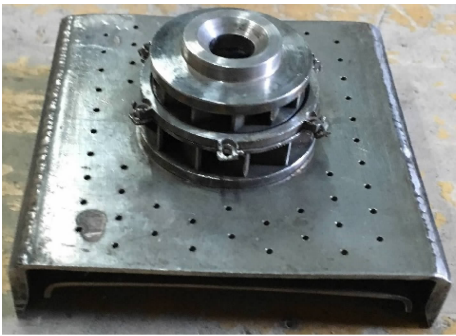


图 2 双径向旋流器
Fig. 2 Dual radial swirler

实验过程中通过调节空气入口的电动阀开度来控制空气流量,以保证燃烧室内的入口空气压

力稳定在设定值附近,逐渐降低燃油的供给(燃油质量流量每次降低约 0.05 g/s),使燃烧室逐渐逼近贫油熄火状态直至发生熄火(通过观察窗查看燃烧室火焰判断),全程采用摄像机记录火焰图像(熄火过程火焰形状变化如图 3 所示),每组实验根据实验数据的质量重复操作 2~3 次。对于数据中的熄火判断,则通过观察实验数据中燃烧室的压力温度发生阶跃的时间点作为熄火点,考虑到燃烧室内的湍流燃烧会导致燃烧室参数波动,所以取熄火点前一段较为平稳的数据做平均化处理作为最终的熄火实验数据,具体数值如表 1 所示,其中贫油熄火油气比为入口燃油流量与入口空气流量的质量比,通过计算获得。

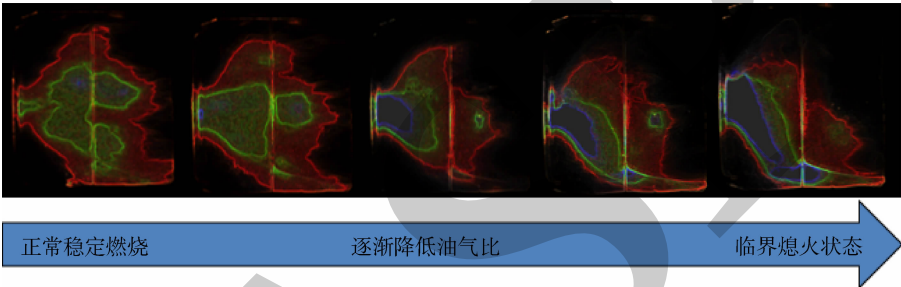


图 3 火焰形状随油气比变化
Fig. 3 Flame shape varies with gas-oil ratio

表 1 贫油熄火实验数据
Table 1 Experiment data of lean blowout

燃油种类	入口压力/ kPa	实测 LBO 油气比/ 10^{-3}	实测 LBO 误差/%	火焰相对 体积/%	空气 质量 流量/ (g/s)	入口空气 温度/ $^{\circ}\text{C}$	混合气 出口 温度/ $^{\circ}\text{C}$	雾化 索太尔 平均直径 $D_{32}/\mu\text{m}$	空气导热 系数 $\kappa_a/$ (W/(m/ $^{\circ}\text{C}$)))	空气 比定压 热容 $c_p/$ (kJ/(kg $\cdot^{\circ}\text{C}$)))
RP-3	140	6.469	0.65	30.91	513.82	25.35	224.80	56.410	40.561	1.030
	190	5.875	0.18	31.05	519.01	25.65	196.38	54.496	38.628	1.025
	220	5.426	1.04	31.79	489.61	29.15	181.12	54.994	37.591	1.022
柴油	140	6.397	0.92	38.38	517.16	32.26	218.59	60.590	40.138	1.029
	190	5.844	1.66	35.67	528.15	31.97	195.97	58.295	38.600	1.024
	220	5.541	0.61	36.67	491.95	29.21	178.19	58.652	37.391	1.021
高沸点 费托油	140	6.044	0.62	40.04	530.17	31.27	204.13	59.547	39.155	1.026
	190	5.865	0.48		519.65	30.55	191.51	57.283	38.297	1.024
	220	5.714	0.17	34.38	491.41	29.32	160.08	56.448	36.126	1.019

由于湍流的不稳定会导致火焰波动,取单张火焰图像进行处理存在非常大的误差,所以通过对火焰视频逐帧取图,利用 Photoshop 软件对临

熄火前 1s 的火焰图像(熄火前 1 帧至熄火前 25 帧)进行叠加,并转化为灰度图取阈值获得火焰面积(如图 4 所示),再乘以火焰筒的宽度即可获得

火焰体积^[18]。由于本次实验火焰筒结构尺寸固定,所以火焰体积与火焰面积成正比,考虑到摄像机拍摄位置变动会导致图像大小变化,故以每次观察窗面积(实际面积 55 cm×60 cm)作为基准以校准火焰体积(如图 5 所示),从而获得火焰相对体积,其具体数据如表 1 所示。

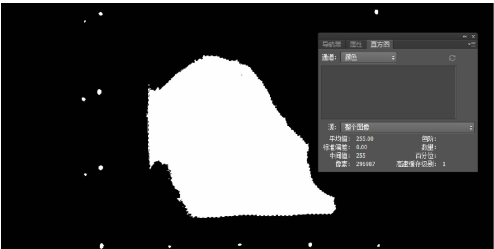


图 4 Photoshop 取火焰面积
Fig. 4 Get flame area by Photoshop

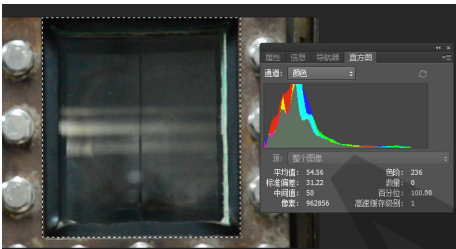


图 5 观察窗面积
Fig. 5 Observation window area

1.2 燃油组成及理化性质

理化性质及物质组成测试结果如图 6、表 2 所示,测定设备及方法如表 2 所示。

其中物质组成采用 GC-MS 分析,RP-3 分析的色谱条件:采用 HP-5MS 色谱柱,载气为高纯氦气,体积流量 1 mL/min,分流比为 50 : 1,进样口温度为 280 ℃,柱温为 50 ℃,保留 5 min,以 2.5 ℃/min 升温至 260 ℃,保持 5 min。质谱条件:离子源为电子轰击离子源(EI),离子源温度为 230 ℃,四级杆温度为 150 ℃。柴油和高沸点费托油的色谱条件:柱温 50 ℃,保持 2 min,以 3 ℃/min 升温至 300 ℃,保持 5 min,其他条件与 RP-3 相同。

从实验数据可知:碳数分布上,高沸点费托油(平均碳数为 16)与柴油(平均碳数为 15)的分布较为相似且大于 RP-3(平均碳数为 10);物质组成上,RP-3 的组成最为丰富,而高沸点费托油由于其工艺特殊,只含链烷烃且绝大部分为直链烷烃(如图 6)。

碳数及物质组成差异会对燃油本身的理化性

质产生影响(如表 2 所示),黏度要受到碳数影响,所以 RP-3 的黏度最小,柴油与费托油相近且均高于 RP-3;热值受碳数和物质组成影响,RP-3 虽然碳数低,但由于含较多不饱和烃导致热值变低,高沸点费托油全部为饱和烷烃,所以其热值最高。密度也受到物质组成和碳数分布的影响,高沸点费托油虽然碳数较大,但是由于其所含的均为烷烃物质,所以其密度最小,这些性质的差异可能对燃油的贫油熄火性能造成影响。

1.3 实验误差分析

贫油熄火实验的误差主要来自于机械误差和人为误差,机械误差主要是传感器本身的精度,人为误差包括喷嘴流量标定时候的仪表读数误差,压力控制误差,计时误差等。由于熄火油气比是根据燃油流量以及空气流量计算获得,而燃油流量根据喷嘴流量标定之后计算获得,空气流量则通过传感器获得体积流量,再根据密度计算获得,根据误差传递理论,贫油熄火实验获得的油气比数据的误差约为 4 %。

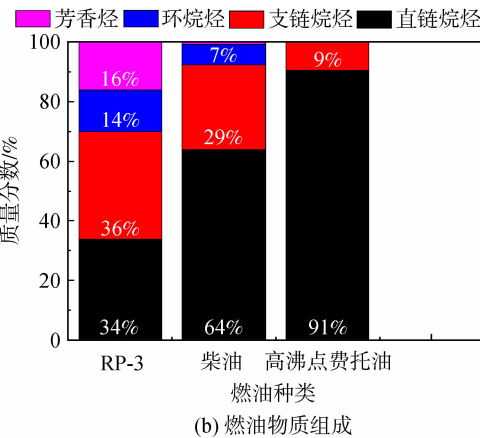
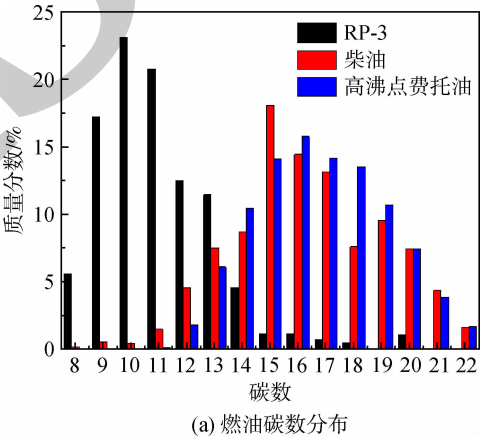


图 6 燃油的碳数分布及物质组成
Fig. 6 Carbon number and material composition of fuel

表 2 物质组成及理化性质测定
Table 2 Determination of material composition and properties

测试内容	RP-3	柴油	高沸点费托油	测试设备	操作标准
物质组成	见图 6	见图 6	见图 6	7890A-5975C 型气相色谱质谱联用仪	
密度/(kg/m ³)	794	818.5	777	SYA-1884A 型石油产品密度实验器	GB/T1884-2000
热值/(kJ/kg)	46313.5	46903.9	47121.9	HWR-15E(改进型)氧弹热量计	GB/T384-1981
黏度/(Pa·s)	1.587	5.541	5.123	SYD-265H 型石油产品运动黏度测定器	GB/T265-1988
表面张力/(mN/m)	24.5	26.54	26.26	SFT-A1 型表面张力仪	ASTM/D1331-11

2 实验结果及分析

2.1 Lefebvre 预测公式

从贫油熄火油气比数据(如表 1 所示)可以看出,在相同燃油的情况下,入口压力变化导致的熄火油气比变化则在 20%内;而在相同入口压力的条件下,燃油性质变化导致的贫油熄火油气比变化在 7%内,结果表明燃油性质差异对贫油熄火边界影响小于入口压力变化导致的影响。

根据 Lefebvre^[4]对于贫油熄火边界的研究,影响燃烧室贫油熄火边界的因素可以被分解成三部分:燃烧室结构、燃烧室工况以及燃油本身性质,具体的关系表达式如式(1)~式(2)所示^[4]。

$$\phi_l = \left(\frac{A f_{pz}}{V_{pz}} \right) \left[\frac{\dot{m}_a}{p^x \exp(T/300)} \right] \left(\frac{D_{32}^2}{\lambda_f H_{lv}} \right) \quad (1)$$

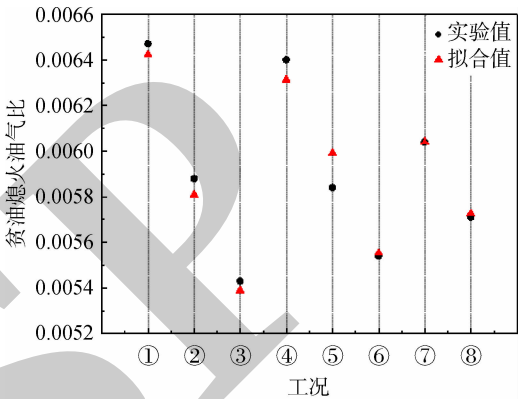
$$\lambda_f = \frac{3 \kappa_a \ln(1+B)(1+0.22 Re_d^{0.5})}{\rho_f c_{p,g}} \quad (2)$$

其中 ϕ_l 为贫油熄火油气比, A 为结构常数, f_{pz} 为进入燃烧室的空气比例, V_{pz} 为燃烧室体积, $\dot{m}_a$ 为空气流量, p 为空气压力, T 为燃烧室温度, D_{32} 为索太尔平均直径, H_{lv} 为燃油低位热值, λ_f 为燃油有效蒸发常数, Re_d 为当地雷诺数, B 为输运数, ρ_f 为燃油密度, $c_{p,g}$ 空气比定压热容,对于压力指数 x , Lefebvre^[4]取值为 1.3。

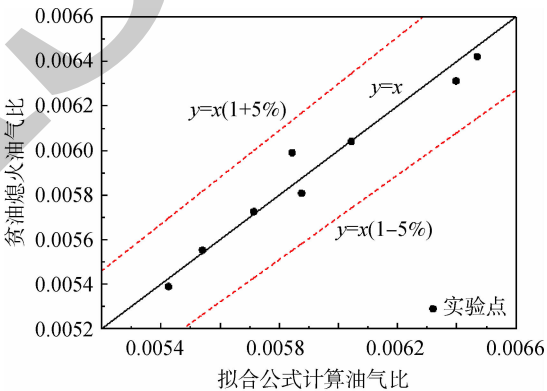
而本次实验条件中控制燃烧室结构不变,故将式(1)中的部分参数(实验中不发生变化的或无法获取的值)取为常值并整合至常数 A ,如式(3)所示,其中 V_{rel} 为相对火焰体积。

$$\phi_l = \left(\frac{A}{V_{rel}} \right) \left[\frac{\dot{m}_a}{p^x \exp(T/300)} \right] \left(\frac{D_{32}^2 \rho_f c_p}{\kappa_a H_{lv}} \right) \quad (3)$$

将实验数据进行拟合分析,发现当压力指数 x 取 1.1,常数 A 取 6.25 时,拟合值与本次实验值的误差最小,拟合程度如图 7。图中工况①为 RP-3(140 kPa),工况②为 RP-3(190 kPa),工况③为 RP-3(220 kPa),工况④为柴油(140 kPa),工



(a) 实验值与拟合值对比图



(b) 拟合程度图

图 7 预测公式拟合程度图

Fig. 7 LBO comparison of measured and predicted

况⑤为柴油(190 kPa),工况⑥为柴油(220 kPa),工况⑦为高费托(140 kPa),工况⑧高费托(220 kPa),故本次熄火油气比实验的拟合公式如式(4)所示。

$$\phi_l = \frac{6.25}{V_{rel}} \cdot \frac{\dot{m}_a}{p^{1.1} \exp(T/300)} \cdot \frac{D_{32}^2 \rho_f c_p}{\kappa_g H_{lv}} \quad (4)$$

其中 $\frac{6.25}{V_{rel}}$ 为结构项, $\frac{\dot{m}_a}{p^{1.1} \exp(T/300)}$ 为工况项, $\frac{D_{32}^2 \rho_f c_p}{\kappa_a H_{lv}}$ 为燃油项。实验值如表 1、表 2 所示,各项拟合值如表 3、表 4 所示。

表 3 Lefebvre 各项值随压力变化表(以 220 kPa 为基准)

Table 3 Parameters of Lefebvre prediction formula changed with pressure (based on 220 kPa)

燃油	压力/ kPa	式(4)中 工况项	变化 幅度 %	式(4)中 燃油项/ 10 ⁻³	变化 幅度 %	式(4)中 结构项	变化 幅度 %	计算 油气比/ 10 ⁻³	变化 幅度 %
RP-3	140	0.2294	17.95	3.462	-1.74	8.087	2.82	6.422	19.17
	190	0.2137	9.87	3.376	-4.18	8.052	2.37	5.808	7.78
	220	0.1945		3.523		7.865		5.389	
柴油	140	0.2361	18.83	4.104	0.13	6.514	-4.45	6.313	13.69
	190	0.2172	9.30	3.935	-4.01	7.009	2.82	5.990	7.88
	220	0.1987		4.099		6.817		5.553	
费托	140	0.2527	18.85	3.830	3.39	6.243	-14.15	6.041	5.50
	190	0.2189	2.98	3.616	-2.39				
	220	0.2126		3.704		7.272		5.726	

表 4 Lefebvre 各项值随燃油变化表(以 RP-3 为基准)

Table 4 Parameters of Lefebvre prediction formula changed with fuel (based on RP-3)

压力/ kPa	燃油	式(4)中 工况项	变化 幅度/%	式(4)中 燃油项/ 10 ⁻³	变化 幅度/%	式(4)中 结构项	变化 幅度/%	计算油气比/ 10 ⁻³	变化 幅度/%
140	RP-3	0.2294		3.462		8.087		6.422	
	柴油	0.2361	2.95	4.104	18.55	6.514	-19.46	6.313	-1.70
	费托	0.2527	10.2	3.830	10.62	6.243	-22.80	6.041	-5.93
190	RP-3	0.2137		3.376		8.052		5.808	
	柴油	0.2172	1.65	3.935	16.55	7.009	-12.95	5.990	3.14
	费托	0.2189	2.46	3.616	7.10				
220	RP-3	0.1945		3.523		7.865		5.388	
	柴油	0.1987	2.19	4.099	16.34	6.817	-13.32	5.553	3.06
	费托	0.2126	9.32	3.704	5.13	7.272	-7.54	5.726	6.28

本公式以 Lefebvre 预测理论为基础结合三种燃油三种工况进行数据拟合获得,由于其为经验公式,所以其适用范围具有一定的局限性,即在入口空气温度在 25~30℃之间,空气流量在 500 g/s 左右下均具有较好的预测能力,而在燃油的适用性上,馏程在 100~300℃范围内的费托合成油以及馏程在 140~300℃的石油基燃油有较好的预测能力;对于其他工况及燃油是否适用,还有待进一步的实验来验证公式的准确性。

2.2 燃烧室控制条件影响

贫油熄火油气比随入口压力变化有两个明显的特征。①三种燃料的贫油熄火油气均随入口压

力升高而下降;②不同燃油贫油熄火油气比变化幅度与燃油性质有关(如图 8 所示)。

随着入口压力的增加,贫油熄火油气比降低。根据表 3 的数据分析发现燃烧室压力变化会导致三项影响因素都发生变化,但每项因素影响程度不同,而导致熄火油气比随入口压力变化而变化的主要因素是工况项的变化,工况项的变化则来自于入口压力和反应温度,从数据上分析这两个因素对于工况项的作用是相反的,但入口压力的直接影响最大为 29.99%而反应温度直接影响最大为 13.66%,所以工况项的变化趋势受入口压力的影响最大变化幅度仅为 18.85%。结构项和

燃油项均受到入口压力变化导致的间接影响,但引起的变化幅度要小于工况值,所以贫油熄火油气比变化趋势与工况值的趋势较一致。

油气比随入口压力的变化幅度与燃油种类有明显的关系(RP-3 为 19.17%,柴油为 13.69%,高沸点费托油为 5.50%)。表 3 数据表明三种燃油工况项和燃油项的数值变化幅度和趋势大致相似,而结构项变化幅度差距比较大,所以造成不同燃油贫油熄火油气比随入口压力变化的幅度不同的因素为结构项,结构项对贫油熄火油气比的影响与入口压力的影响恰好相反。从式(3)中可以看出本实验结构项的影响因素只有火焰体积,高沸点费托油的火焰面积受压力影响最大,而 RP-3 的火焰体积受到的影响最小,从而导致了入口压力变化下,RP-3 油气比变化最大,高沸点费托油最小。

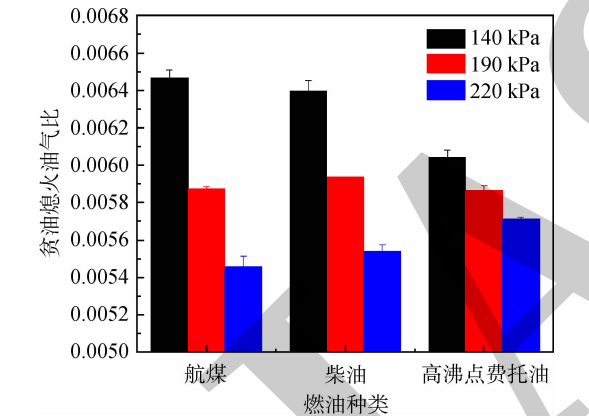


图 8 贫油熄火油气比随燃烧室入口压力变化
Fig. 8 LBO of fuel in different input pressure

2.3 燃料组成的影响

贫油熄火油气比随燃油种类变化规律与入口压力有较大关系:在 140 kPa 下,RP-3 的油气比要高于高沸点费托油;在 220 kPa 下,高沸点费托油的油气比高于柴油。(如图 9 所示)

根据表 4 的数据分析可知工况项和燃油项的变化规律及幅度在 140 kPa 和 220 kPa 下非常相似,两者组合一起导致高沸点费托油的贫油熄火油气比要大于 RP-3,而结构项对于贫油熄火油气比的影响恰好相反且结构项的变动幅度在 140 kPa(22.8%)和 220kPa(13.32%)的差距较大,所以导致高沸点费托油的贫油熄火油气比在低压下优于 RP-3 而在高压下则劣于 RP-3 的原因来自于结构项。

在本实验中导致结构项变化的因素仅为火焰

体积,从表 1 可以看出 RP-3 在发生贫油熄火时的火焰体积随压力变化的幅度很小,可以认为无明显变化,高沸点费托油的变化幅度最大且随着压力增加而减小,即随着入口压力的降低,三种燃油之间的火焰体积差异逐渐增大,这就导致了在 140 kPa 下结构项对于熄火油气比的影响要比工况项和燃油项的组合大,贫油熄火油气比的变化趋势受结构项控制;而在 220 kPa 时结构项的影响降低,工况项和燃油项的组合占优。

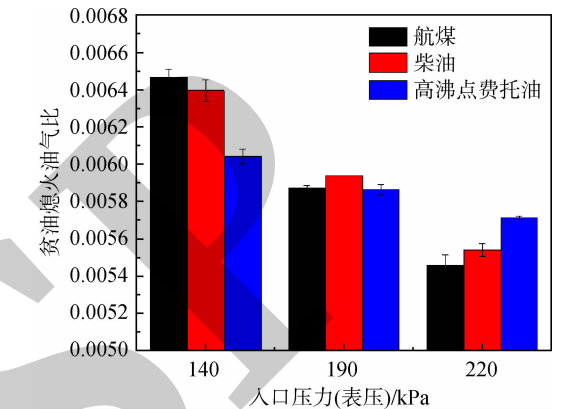


图 9 贫油熄火油气比随燃油种类变化
Fig. 9 Change of LBO in different fuel

除了结构项这一影响因素外,燃油项也是一个比较重要的影响因素(最大为 18.55%),影响燃油项的因素主要来自燃油本身的理化性质(最大为 3.82%,来自密度和热值)以及雾化直径(最大为 15.37%),在 140 kPa 时由于结构项的影响较大,导致燃油项的影响被覆盖,而在 220 kPa 时与结构项的几乎相互抵消,所以燃油项的性质差异在贫油熄火油气比上体现的不明显。

2.4 影响因素分析

试验结果表明影响燃油贫油熄火边界的因素有入口空气压力(最大为 30.02%,以 220 kPa 下 RP-3 数据为基准,以下均取最大值),燃烧室温度(13.55%),火焰体积(20.62%)以及燃油的雾化直径(21.39%)以及密度热值(3.82%)。其中火焰体积、燃烧室温度以及雾化直径随空气压力以及燃油组成而变化。

从火焰体积角度分析,随入口空气压力增加,火焰体积会变小,而变小的幅度则会受到燃油物质组成的影响,RP-3 的火焰体积受入口空气压力影响最小(2.82%),柴油次之(9.95%),高沸点费托油最大(14.15%)。其可能的原因来自于燃油的碳数分布以及物质种类。柴油和高沸点费托油

的碳数分布大,所以压力降低导致入口空气流速增加可以提高燃油的雾化效果,与空气混合更加均匀,火焰体积被拓展,而高沸点费托油的支链烷烃较少(仅 9.5%),蒸发性能较差,所以受空气流速的影响较大。

从燃烧室温度变化角度分析,其主要受入口空气压力影响,最大影响程度为 13.66%。在空气入口质量流量保持不变的情况下,入口空气压力的降低会导致空气流速增加,而燃烧室为了维持火焰稳定则需要提高燃油的供给量,从而形成燃烧室的温度随入口压力降低而提高的现象。

从雾化直径角度,受入口空气压力和燃油性质共同决定,其中燃油性质的影响占主要地位(最大为 15.37%),入口空气压力影响相对较小(最大为 11.28%)。入口空气压力的影响是通过压力下降导致流速增加,从而熄火燃油流量增加,但空气流速和燃油流量对燃油雾化起着相反的作用,所以雾化直径的变化趋势不明确且变化幅度也比较小。RP-3 的碳数最低,其雾化直径最小,而柴油和高沸点费托油的碳数分布相近,其雾化直径还受其他因素的影响,包括燃油流量、供油压力等。

对于贫油熄火油气比的影响中,入口空气压力的减小使得熄火油气比升高,但是由此导致的火焰体积增大和燃烧室温度升高使得贫油熄火油气比下降,所以在贫油熄火油气比的影响因素中虽然存在变化幅度较大的因素(超过 20%),但由于其相互抵消导致最终的贫油熄火油气比的变化幅度不大(最大仅 20%)。燃油的差异主要在燃烧室火焰体积来体现,在雾化直径、密度热值上的变化差异较小,从而导致其在贫油熄火油气比上无法明显体现。

3 结 论

本文研究了燃油物质组成以及燃烧室入口压力对于贫油熄火边界的影响,采用 RP-3、柴油以及高沸点费托油三种燃油进行了三种不同压力工况下的贫油熄火油气比测量,并基于 Lefebvre 的贫油熄火预测公式进行了影响因素分析,得出以下结论:

1) 燃油性质对贫油熄火边界的影响(以 RP-3 为基准,最大为 6.26%)要小于入口压力变化所引起的(以 220 kPa 为基准,最大为 19.17%)。

2) 贫油熄火油气比的影响因素有入口压力(30.02%),火焰体积(20.62%),燃烧室温度

(13.55%),燃油雾化直径(21.39%)以及燃油热值和密度(3.82%),其中火焰体积和燃油雾化直径受入口压力和燃油组成性质共同影响。

3) 不同燃油的贫油熄火油气比随压力降低而增大的幅度不同主要是由燃油组成差异(碳数分布和支链烷烃含量)导致的结构项差异(火焰体积)引起的,高碳数支链烷烃含量少的燃油可能会提高火焰体积对贫油熄火油气比的影响。

4) 贫油熄火影响因素中入口压力造成的贫油熄火油气比变化程度会受其影响的火焰体积和燃烧室温度变化而削弱。

参考文献:

- [1] GREGG G F,URS Z. Environmental trends in aviation to 2050[R]. Montreal, Canada: Canada International Civil Aviation Organization, 2016.
- [2] LONGWELL J P,WEISS M A. High temperature reaction rates in hydrocarbon combustion[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1955, 47(8): 1634-1643.
- [3] LONGWELL J P,FROST E E,WEISS M A. Flame stability in bluff body recirculation zones[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1953, 45(45): 1629-1633.
- [4] LEFEBVRE A H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1985, 107(1): 24-37.
- [5] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. Weak extinction limits of turbulent flowing mixtures[J]. Journal of Engineering and Power, 1979, 101(3): 343-348.
- [6] LEONARD P A, MELLOR A M. Correlation of lean blow-off of gas turbine combustors using alternative fuels[J]. Journal of Energy, 2015, 7(6): 729-732.
- [7] ATESHKADI A, MCDONELL V G, SAMUELSEN G S. Lean blowout model for a spray-fired swirl-stabilized combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(1): 1281-1288.
- [8] XIE Fa, HUANG Yong, WANG Fang, et al. Visualization of the lean blowout process in a model combustor with a swirl cup[R]. ASME Paper GT2010-22534, 2010.
- [9] RIZK N K, MONGIA H C. Three-dimensional analysis of gas turbine combustors[J]. Journal of Propulsion and Power, 2011, 7(3): 445-451.
- [10] MONGIA H C, RIZK N K. Gas turbine combustor performance evaluation[R]. AIAA-91-0640, 1991.
- [11] 张宝诚, 纪友哲, 王平. 航空发动机燃烧室熄火特性的研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2004, 21(3): 1-3.
ZHANG Baocheng, JI Youzhe, WANG Ping. Study on blowout characteristics in aeroengine combustor[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2004, 21(3): 1-3. (in Chinese)
- [12] WANG Huiru, JIN Jie. Lean blowout predictions of a non-

premixed V-gutter stabilized flame using a damkohler number methodology[R]. ASME Paper GT2011-45958,2011.

[13] 蔡文祥,赵坚行,胡好生,等. 燃烧室贫油熄火极限数值预测[J]. 航空动力学报,2010,25(7):1478-1484.

CAI Wenxiang,ZHAO Jianxing,HU Haosheng,et al. Numerical prediction of lean blowout in aero-engine combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(7):1478-1484. (in Chinese)

[14] 张智博,郑洪涛,凌瑞. 使用特征参数准则预测航空发动机燃烧室贫油熄火极限[J]. 航空动力学报,2014,29(7):1631-1638.

ZHANG Zhibo,ZHENG Hongtao,LING Rui. Feature-parameter-criterion for predicting lean blowout limit of aero-engine combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(7):1631-1638. (in Chinese)

[15] 张智博,郑洪涛,李雅军. 基于特征参数准则的舰船燃机燃烧室贫熄预测[J]. 哈尔滨工程大学学报,2014,35(2):177-183.

ZHANG Zhibo,ZHENG Hongtao,LI Yajun. Prediction of lean blowout on marine gas turbine combustor based on feature-parameter-criterion[J]. Journal of Harbin Engineering University,2014,35(2):177-183. (in Chinese)

[16] 谢法,黄勇,苗辉,等. 气量分配对轴径向旋流杯燃烧室贫熄边界的影响[J]. 航空动力学报,2011,26(8):1756-1760.

XIE Fa,HUANG Yong,MIAO Hui,et al. Effects of air-flow split and primary holes arrangement on the lean blowout limits of a combustor with axial-radial swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(8):1756-1760. (in Chinese)

[17] 谢法,黄勇,苗辉,等. 气量分配对双轴向旋流器燃烧室贫熄性能影响[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(11):1456-1460.

XIE Fa,HUANG Yong,MIAO Hui,et al. Effects of air-flow split and primary holes arrangement on lean blowout limits of combustor with dual-axial swirlers[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2011,37(11):1456-1460. (in Chinese)

[18] 孙磊,黄勇,张鼎,等. 改进的预测气体燃料贫油熄火边界的半经验公式[J]. 推进技术,2015,36(11):1677-1685.

SUN Lei,HUANG Yong,ZHANG Ding,et al. An improved semi-empirical correlation for prediction of lean blowout limits for gas turbine combustors using gas fuel[J]. Journal of Propulsion Technology,2015,36(11):1677-1685. (in Chinese)

[19] 徐浩鹏,王方,黄勇,等. 头部气量分配对旋流杯结构燃烧室贫熄性能的影响[J]. 航空动力学报,2009,24(2):347-352.

XU Haopeng,WANG Fang,HUANG Yong,et al. Effects of flow split among swirlers and primary holes on the lean blowoff limits of a combustor with swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(2):347-352. (in Chinese)

(编辑:李岩梅、张雪)