

中心分级燃烧室主燃级设计参数的试验研究^{*}

鄂亚佳, 陈伟, 何沛, 冯晓星, 徐榕

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘要: 为研究中心分级燃烧室的主燃级设计, 设计了多个主燃级方案, 并在单头部燃烧室试验件上开展试验研究。试验结果表明: 燃油停留时间对燃烧效率影响最大, 喷点个数和旋流数对燃烧效率也有一定的影响, 级间距对燃烧效率的影响主要体现在小状态; 级间距、喷点个数对 NO_x 排放影响最大。在本次研究的试验方案中级间距变化对燃烧稳定性的表现有明显的影响。

关键词: 民用航空发动机; 燃烧室; 主燃级设计; 分级燃烧; 试验

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210178-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210178

Experimental Study on Main Mixer Design Parameters for Central Staged Combustor

E Ya-jia, CHEN Wei, HE Pei, FENG Xiao-xing, XU Rong

(AECC Commercial Aircraft Engine Co. Limited, Shanghai 200241, China)

Abstract: To study main mixer design parameters effect on combustion performance, several main mixers are designed and test on single cup combustor is performed. Test results show that fuel fly time is the most important influence factor on combustion efficiency, main fuel nozzle number and SN number are the second influence factors, stage gap influences combustion efficiency only on low load working condition. For NO_x emission, gap and nozzle number are the most important influence factors. Stage gap is found to be the most important influence factor on combustion instability.

Key words: Civil aero engine; Combustor; Main mixer design; Lean burn combustion; Test

1 引言

为满足日益严格的民用飞机污染排放物要求, 民用航空发动机必须采用低污染燃烧室, 目前低污染燃烧室可以分为两种技术路线, 分别为: 贫油的中心分级组织燃烧方式和富油燃烧-快速淬熄-贫油组织燃烧方式。其中中心分级低污染TAPS燃烧室^[1]已经成功运用在GE公司的LeapX和GENx发动机上, 其 NO_x 排放相比CAPE6可以降低50%左右, 实现了商业运营, 并在行业内有较高影响力。罗罗公司也研发了中心分级燃烧室, 并已经在3E核心机上开展了试

验^[2]。NASA主持的ERA项目下^[3], GE公司以 NO_x 排放相比CAPE6降低75%为目标, 设计中心分级燃烧室, 在单头部燃烧室试验件上验证了13种头部方案, 筛选出3个方案, 继续开展多头部扇形和高温高压单头部上的自燃、回火试验。国外的中心分级低污染燃烧室研制过程中, 头部设计中关键参数的影响分析往往以成本低、进气温度、压力高的单头部试验件为平台进行研究。

国内针对中心分级燃烧室也开展了研究, 包括基于数值模拟方法和试验方法的研究。其中, 南京航空航天大学颜应文等^[4]开展了数值研究, 仿真燃烧

^{*} 收稿日期: 2021-03-23; 修订日期: 2021-05-08。

通讯作者: 鄂亚佳, 硕士, 工程师, 研究领域为燃烧室气动设计。

引用格式: 鄂亚佳, 陈伟, 何沛, 等. 中心分级燃烧室主燃级设计参数的试验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 210178. (E Ya-jia, CHEN Wei, HE Pei, et al. Experimental Study on Main Mixer Design Parameters for Central Staged Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210178.)

室内流场和温度场,邓远灏等^[5]对 Lean Premixed Pre-evaporation(简称 LPP)LPP 燃烧室预燃级设计对燃烧室性能的影响开展了数值模拟分析。沈阳航空航天大学的刘威等^[6]通过数值模拟研究了旋流器叶片角度和旋向组合对燃烧室温度分布的影响。王智勇等^[7]、付镇柏等^[8]、李海涛等^[9]对中心分级燃烧室预燃级设计对燃烧室性能的影响开展了相关试验研究;北京航空航天大学的林宇震等^[10]开展了分级/预混预蒸发贫油燃烧低污染排放的初步研究;中国航发商发的何沛等^[11]对中心分级燃烧室 NO_x排放开展了试验研究,并拟合了预估方法。

燃烧室研制是技术成熟度逐步提升的过程^[12],由于燃烧过程是物理和化学过程的耦合,尚不能完全依靠仿真手段获得可靠的设计方案,开展燃烧室试验是燃烧室研制的重要环节。单头部燃烧室试验对气源要求低,试验件结构简单,可以快速完成多个方案的比对试验。单头部燃烧室内部流场和温度场与全环燃烧室存在一些区别,试验获得的燃烧效率和污染排放不能直接代表全环燃烧室性能,但通过单头部燃烧室和全环燃烧室试验可以建立二者之间的关联。另外,通过单头部燃烧室试验对各个方案的性能进行横向比较,对设计具有较强的指导意义。

本文针对中心分级低污染燃烧技术进行研究,通过文献分析主燃级设计关键参数,并以此为基础设计多方案,在单头部试验件上开展对比试验,以此研究主燃级设计参数对燃烧室性能的影响并总结规律。

2 主燃级设计和试验方法

2.1 主燃级设计

2.1.1 燃烧效率的影响因素分析

液体燃料的燃烧经历雾化、蒸发、掺混以及化学反应几个过程,燃烧效率影响因素包括化学反应速度和燃油雾化、蒸发等物理过程的速度。Lefebvre 等^[13]通过研究定义了燃烧效率模型,如式(1)所列,燃烧效率 η_c 是燃烧室内主流速度(或流量 $\dot{m}_a$)、蒸发速度 r_e 、掺混速度 r_m 和反应速度 r_r 的函数。在蒸发和掺混速度均很快的情况下,燃烧效率主要受到化学反应速度和燃烧室内主流速度的影响。LPP 燃烧室主燃级燃油在不同状态下,燃油的雾化质量、掺混速度和蒸发速度变化范围较大,尤其是当燃烧室工作在小状态下,蒸发和掺混速度对燃烧效率的影响更加显著。

$$\eta_c = f(\dot{m}_a)^{-1} \left(\frac{1}{r_e} + \frac{1}{r_m} + \frac{1}{r_r} \right)^{-1} \quad (1)$$

Anderson^[14]通过试验研究了预混预蒸发的燃烧效率。在 800K, 0.55MPa 进气条件下,对比了油气当量比为 0.4, 0.5 和 0.6 的三种情况。燃气在燃烧器内的停留时间为 0.5~3ms。当燃气停留时间超过 1.5ms 之后 CO 生成量达到平衡,燃烧效率达到 99% 以上,在燃气停留时间小于 1.5ms 情况下,停留时间减小导致燃烧效率以近似指数函数的规律下降。燃气停留时间小于 1.5ms 的情况下,燃烧效率随当量比变化更加显著。

综合以上研究,主燃级燃油的掺混程度、蒸发程度以及在燃烧室内的停留时间是影响燃烧效率的主要因素。

2.1.2 NO_x排放的影响因素分析

Anderson^[14]通过试验研究了预混预蒸发燃烧的 NO_x 排放的变化规律。NO_x 生成量在当量比 0.6 的试验工况下受燃气停留时间的影响最大,在当量比 0.4 的试验工况下 NO_x 生成量随燃气停留时间增加基本维持不变。这是因为在当量比低于 0.6 的情况下燃烧区温度低于 1900K,热力型 NO_x 的生成速率低,受时间影响小。

基于 Leonard 等^[15]、Lyons^[16]的试验和计算研究总结出对于贫油预混燃烧室:(1)在燃烧室大状态以及预混合程度高的情况下,液滴粒径小于 50μm,液滴雾化情况对 NO_x 排放没有明显的影响。(2)当燃油预混程度低、油气比高的情况下,预蒸发对降低 NO_x 排放没有影响。(3)在燃烧室中等工况、进气温度压力不是很高的情况下,此时燃油的蒸发率很低,因此液滴雾化和分布情况对排放的影响更大。

Lee 等^[17]对多点直射式预混预蒸发燃烧器开展了试验研究,对比了燃料喷口数量和分布不同的方案产生的 NO_x,试验结果显示在相同油气比条件下,16 喷点均布方案、8 喷点均布方案和 8 喷点密集分布方案 NO_x 排放量依次升高,其中 8 喷点密集分布方案 NO_x 排放量相比另外两个方案差距较大。进一步说明对于 LPP 燃烧来说,燃油分布均匀,消除或限制局部高油气比范围,是降低 NO_x 排放的关键因素。

可见中心分级燃烧室主燃级当量比和火焰筒容积(决定燃气停留时间)是控制 NO_x 排放的关键因素;具体到主燃级设计,喷点越多分布越均匀,NO_x 排放越低;雾化质量到达一定程度后对 NO_x 排放没有明显的影响,而燃油的预混预蒸发程度对 NO_x 排放影响程度最低。

2.1.3 主燃级设计

本文设计了一种中心分级贫油低污染燃烧室头

部^[11],如图 1 所示,预燃级采用离心喷嘴与双级旋流器、文氏管、套筒构成的经典旋流杯结构,主燃级采用多点直射式喷嘴和旋流器构成的预混结构。预燃级在中心,主燃级在外围。为保证顺利点火和小状态下的燃烧稳定性,预燃级进气量较小,仅预燃级供油时,预燃级的油气当量比在 1.5 以上。为降低大状态的污染排放,主燃级进气量较大,在大状态下主燃级当量比 0.6~0.8,以降低 NO_x 排放。预燃级和主燃级的燃油分配比例可调节。

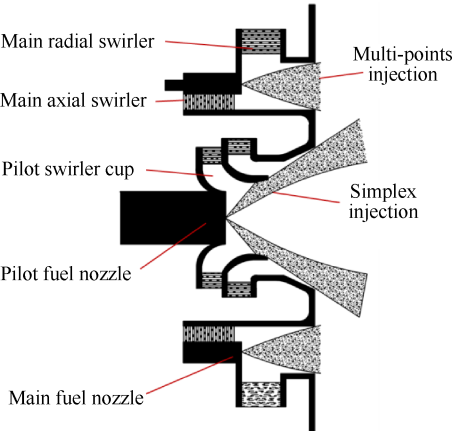


Fig. 1 Low emission swirler and fuel injection system

试验的头部级方案采用模块化结构设计,由主燃级旋流器和喷嘴组件两部分构成,喷嘴组件上集成了主燃级喷嘴、预燃级喷嘴和预燃级旋流杯结构。Base, g1, g2, g3, g4 方案均使用 FN1 喷嘴组件,分别配备 m0~m4 主燃级旋流器。g5 方案由 FN2 喷嘴组件和 m5 主燃级旋流器构成。

根据 2.1.1 和 2.1.2 的研究分析,确定主燃级关键设计参数包括:旋流数(SN)、主燃级喷点个数(Nozzle number)、燃油停留时间(Main fuel delay time)、预燃级与主燃级间距(Gap)。以上述方案(Base)为基准,设计五个对比方案。如表 1 所列。其中,燃油停留时间定义为燃油从离开燃油喷嘴至到达主燃级出口所花费时间。停留时间代表可用于燃油预混合和预蒸发过程的时间。

Base 方案为中等旋流强度,喷点个数为 N 个,燃油从喷口到主燃级出口的停留时间 t ms,预燃级与主燃级之间的间距为 x mm,主燃级进气量不低于 50% 的燃烧室总气量,以降低 NO_x 排放。

Base 方案的燃油停留时间 t 为设计点状态下燃油自燃延迟时间的 50%,燃油液滴的运动受到主燃级气流运动影响,燃油停留时间通过 CFD 计算得到。g1 方案的主燃级设计增加主燃级气流轴向速度与径

向速度之比,从而缩短了燃油停留时间;g2 和 g3 方案增强了旋流强度;g4 方案相比 Base 方案将喷口数量减少 40%,所有喷口有效面积之和保持不变;g5 方案与其他方案相比,旋流最强,并且预燃级与主燃级间距减小一半,主燃级喷点与预燃级喷点的径向距离也相应减小,预燃级和主燃级燃油在火焰筒内分布位置靠近,火焰分布相对集中,燃油喷点个数为 $0.6N$ 。本文中认为中等旋流强度(Middle,缩写为 m)旋流数 SN 为 0.6~0.8,强旋流(Strong,缩写为 s)的旋流数 SN 为 1.0~1.2 以上,另外定义 m+旋流强度,介于中等旋流强度和强旋流之间。

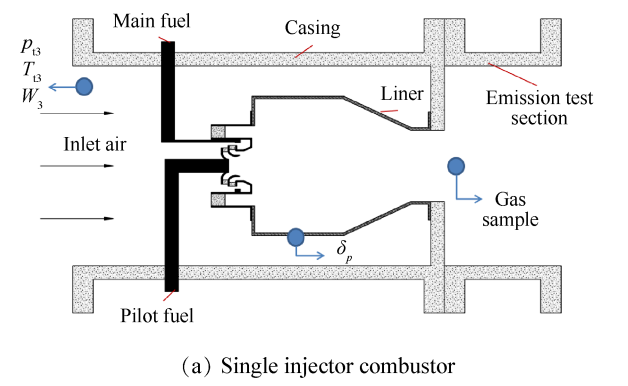
Table 1 Design parameters

Scheme	Base	g1	g2	g3	g4	g5
Fuel nozzle assembly	FN1	FN1	FN1	FN1	FN1	FN2
Main mixer	m0	m1	m2	m3	m4	m5
SN	m	m	m+	s	m	s
Nozzle number	N	N	N	N	$0.6N$	$0.6N$
Fuel delay time	t	$0.85t$	$0.96t$	t	t	$1.02t$
Gap	x	x	x	x	x	$x/2$

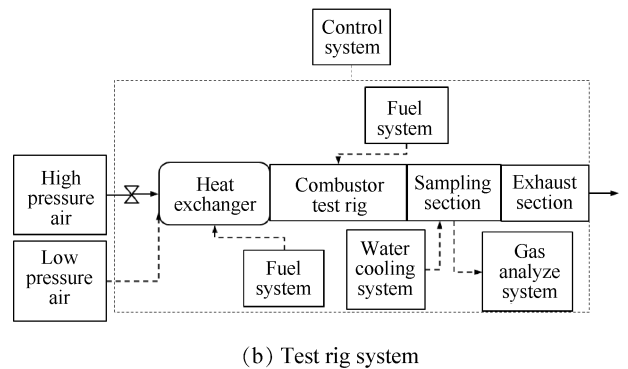
2.2 试验方法

本研究采用了一个单头部试验件^[11],对上述头部方案进行试验研究。试验件示意图如图 2(a)所示,试验件主要由前测量段、试验段机匣、后测量段、前置扩压器、火焰筒、燃油喷嘴和 1 支点火电嘴组成。其中,前测量段、试验段机匣、后测量段之间通过螺栓连接;前置扩压器通过螺栓固定于前测量段法兰;燃油喷嘴和火焰筒通过螺栓固定于试验段机匣。试验系统原理如图 2(b)所示,试验台包括空气供给系统、燃油供给系统、水冷系统、燃气分析系统和数据采集系统。采用连续高压气源和一台加热器对进入试验件的空气加压加热,在试验件进气段测量进口气流温度 T_{i3} ,压力 p_{i3} ,并计算空气流量 W_3 ;采用两路独立油路向燃烧室供入 RP3 航空煤油;水冷系统用于冷却后测量段、取样耙及尾气喷水降温;采用燃气分析系统测量分析燃烧产物成分。用于采集燃气的耙子共有两支,均开有 5 个孔径为 1.0mm 的小孔,5 个采集小孔采用等间距布置,耙子取样孔正对火焰筒出口,采用水冷方法对耙体和采集的样气降温至 CAEP(国际民航组织下属的航空环境保护委员会)规定的 $160^{\circ}\text{C}\pm 15^{\circ}\text{C}$,并持续保温直至传输到燃气分析系统;所有数据通过数据采集系统采集处理。根据采集到的 CO, UHC, CO₂ 等成分浓度,计算得到燃烧效率。

试验件火焰筒壁面上布置了脉动压力探针,采集到的时域信号通过傅里叶变换转化为频域值。



(a) Single injector combustor



(b) Test rig system

Fig. 2 Single injector combustor test rig

本文试验研究共有三个工况:C1,C2和C4,进口温度分别为750K,800K和660K。由于试验条件限制,燃烧室试验件进口压力为2MPa以下,试验油气比为0.015~0.03,覆盖了发动机运行时大多数典型工况的油气比范围。试验的主燃级燃油占总燃油流量的质量比例(本文中也称为分级比 W_{fm}/W_f)变化为50%~91%,主燃级油气当量比 ϕ_m 变化为0.2~0.7,基本覆盖了发动机运行包线内的可能分级比范围。各个方案开展的试验工况如表2所列。

Table 2 Test Matrix

Scheme	Test Condition		
	C1	C2	C4
Base	C1	C2	C4
g1	C1	C2	C4
g2	C1	C2	C4
g3	C1	C2	C4
g4	C1	C2	C4
g5	—	C2	C4

3 结果与讨论

3.1 试验结果数据的处理

试验测得燃烧室出口的燃气成分,并通过组分

计算获得燃烧效率。

将试验得到的 NO_x 浓度换算为 $EI_{\text{NO}_x\text{-test}}(\text{g/kg})$,为方便对比将各个试验状态下的 EI 值换算为同一进口压力 p^* 对应的 EI 值。其中 EI_{NO_x} 为每单位质量(kg)燃油燃烧产生的 NO_x 质量(g)。

$$EI_{\text{NO}_x} = EI_{\text{NO}_x\text{-test}} \cdot (p_{13}/p^*)^{0.5} \tag{2}$$

3.2 燃油停留时间对比试验结果及分析

g1方案燃油停留时间为Base方案的85%,Base方案燃油在主燃级内蒸发及与空气掺混得更充分,试验得到的燃烧效率更高,数据如图3所示。两个方案在试验状态下燃烧效率均随主燃级燃油分级比增加而增加,Base方案燃烧效率随主燃级燃油分级比呈近似线性变化,g1方案两个试验点的燃烧效率增长速率与Base方案近似。

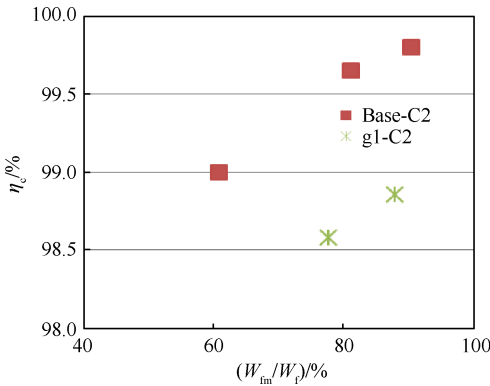


Fig. 3 Fly time influence on combustion efficiency

Base方案和g1方案在试验状态下 NO_x 排放十分接近,g1方案略低,数据如图4所示。说明主燃级燃油预蒸发达到一定程度后 NO_x 排放基本稳定。两个方案 NO_x 排放均随燃油分级比增加而降低,Base方案 NO_x 排放量随主燃级燃油分级比呈近似线性变化,g1方案两个试验点的 NO_x 排放量随主燃级分级比增加而减少的速率与Base方案近似。

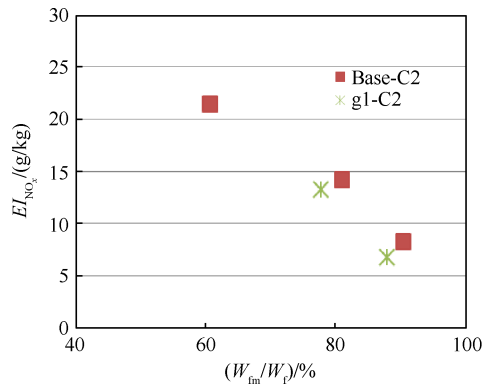


Fig. 4 Fly time influence on NO_x emission

3.3 旋流数对比试验结果及分析

g3 方案主燃级为强旋流,Base 方案为中等旋流。如图 5 所示,试验得到 g3 方案燃烧效率略高于 Base 方案。这是因为 g3 方案旋流强度高、主燃级内部空气流动的切向速度高,对燃油的剪切作用更强,使燃油的雾化更加充分,蒸发效率提升,与空气的掺混速度高,因此燃烧效率有所增加,但提升有限。

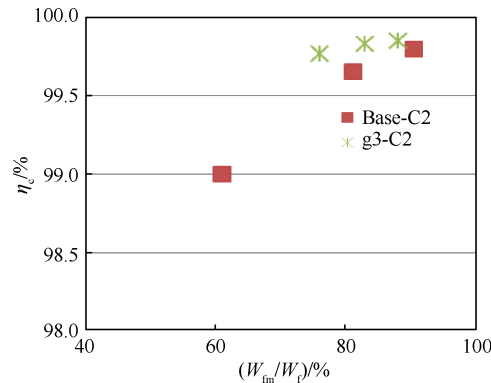


Fig. 5 SN influence on combustion efficiency

如图 6 所示,Base 方案和 g3 方案在试验状态下 NO_x 排放十分接近,由于 g3 方案燃烧效率略高,因此 NO_x 排放也略高于 Base 方案。

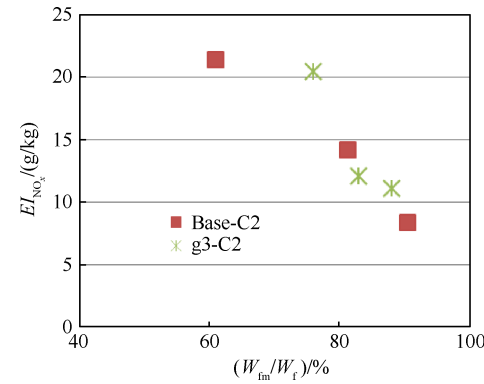


Fig. 6 SN influence on NO_x emission

3.4 主燃级喷点数比试验结果及分析

g4 方案主燃级燃油喷点个数为 Base 方案的 60%,二者燃烧效率试验数据对比如图 7 所示,在燃烧室进口温度较高的 C2 试验状态下,二者燃烧效率很接近;在 C1 试验条件下燃烧室进口温度降低 50K, g4 燃烧效率明显高于 Base 方案,在主燃级分级比低的情况下,差异更加明显。说明主燃级燃油分布集中、局部油气比高,有利于提高燃油蒸发速度进而提高燃烧效率。

在 C2 试验状态下,NO_x 排放试验数据对比如图 8 所示, g4 和 Base 方案的 NO_x 排放相比, g4 明显高于 Base 方案,主燃级分级比增加到 90% 后,二者差异缩

小。对于中心分级预混预蒸发的主燃级设计,主燃级喷点个数和燃油分布均匀度对 NO_x 排放的影响十分明显,应作为低污染燃烧室设计重点关注的参数。在 C1 试验状态下,由于 g4 燃烧效率更高,化学反应充分,因此 NO_x 排放更高。

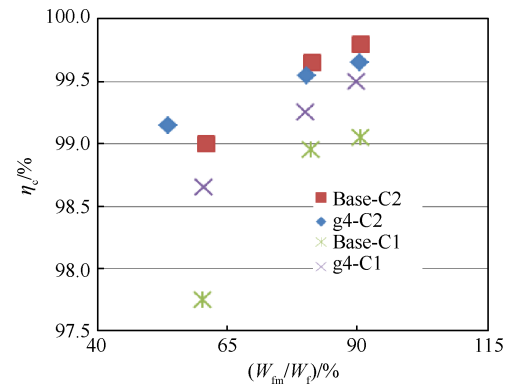


Fig. 7 Nozzle number influence on combustion efficiency

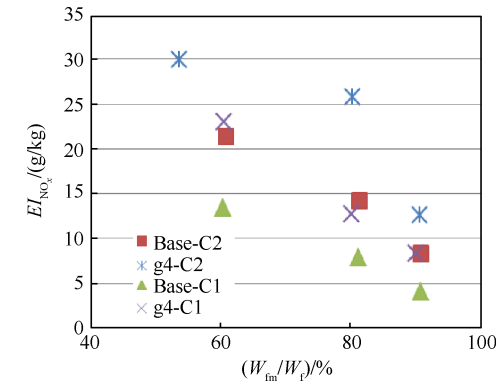


Fig. 8 Nozzle number influence on NO_x emission

3.5 级间距对比试验结果及分析

g4 和 g5 方案均为强旋,燃油停留时间一致,主要区别是预燃级和主燃级之间的间距不同。g5 方案的级间距更小,主燃级燃油喷点所在节圆内径小,因此主燃级燃油在火焰筒内的分布更加向内收拢,火焰位置距离预燃级火焰位置更近,甚至可能重叠。二者燃烧效率的试验结果如图 9 所示,在 C2 试验状态下,两个方案燃烧效率基本一致,与 Base 方案也基本一致。在 C4 试验状态下,进气温度低,两个方案的燃烧效率均呈现随主燃级燃油分级比升高而降低的趋势,分析认为在此条件下主燃级燃油的蒸发很不充分,大部分燃油在预燃级燃烧区完成化学反应,因此主燃级燃油越多燃烧效率越低。在 C4 试验状态下, g4 方案的燃烧效率低于 g5 方案,这是因为 g5 方案间距小,预燃级火焰对主燃级燃油燃烧影响更大,燃烧效率更高。

对比两个方案的 NO_x 排放,如图 10 所示,在 C2 试验状态下 g5 方案 NO_x 排放高于 g4 方案,说明在燃油分

布均匀性和燃油停留时间一致的条件下,预燃级和主燃级间的级间距减小造成 NO_x 排放升高。结合燃烧效率的试验结果分析认为,主燃级燃油分布贴近预燃级火焰,导致主燃级燃烧区温度升高,由此导致 NO_x 排放增加。C4状态下由于燃烧效率低,两个方案的 NO_x 排放均较低且基本一致。总体而言,间距增加导致燃烧效率降低和 NO_x 排放量减少,因此设计时需要综合考虑燃烧效率和 NO_x 指标,确定合理的级间距。

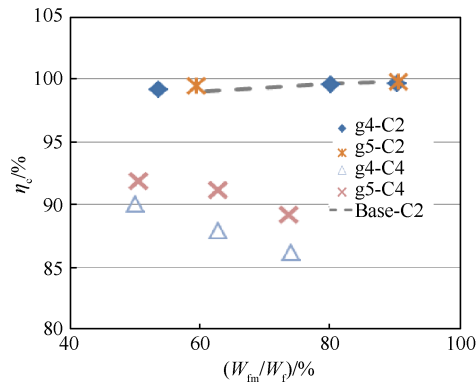


Fig. 9 Gap influence on combustion efficiency

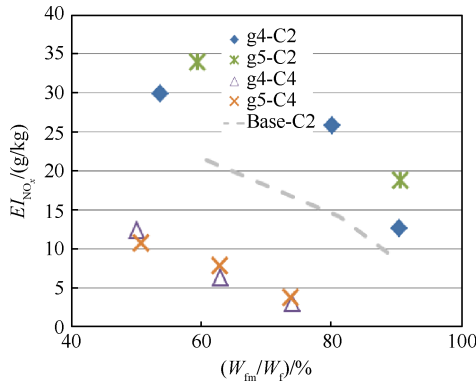


Fig. 10 Gap influence on NO_x emission

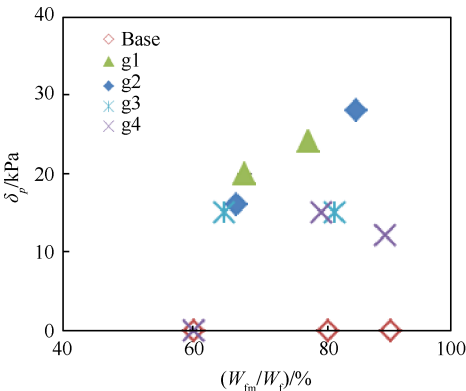
3.6 火焰筒脉动压力的试验数据

通过布置在试验件火焰筒壁面上的脉动压力探针,获得各个方案的火焰筒内压力脉动频率和幅值。主频如表 3 所列,试验未出现明显的脉动压力时,表中主频标注为“/”,未开展试验的用“-”标注。脉动压力的幅值如图 11 所示。试验数据显示:在 C4 试验状态,各个方案均无明显的压力脉动;在 C1 状态、C2 状态,不同方案的主频略有差异,且主频随进气温度升高而增加;g5 方案在各个状态均无压力脉动,其余方案在燃烧效率低于 90% 的情况下没有出现压力脉动。由于 g5 方案与其余方案的主要设计差异在于 g5 方案级间距更小,以及由此导致的主燃级与预燃级燃油分布相对集中,初步分析认为 g5 方案主燃级火焰更容易被预燃级火焰稳定住,因此燃烧稳定性好;

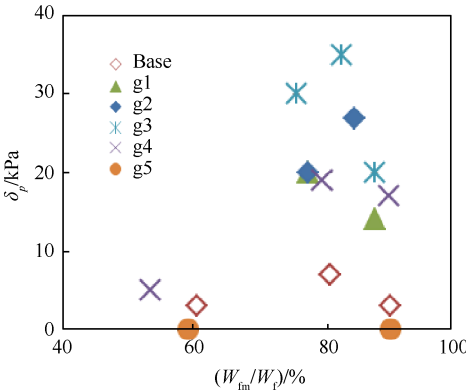
而本文研究范围内的旋流强度、燃油停留时间、喷点个数等设计参数,对于燃烧稳定性没有明显影响。由于单扇区试验件的几何结构和声学边界条件与燃烧室实际工作环境不同,并且仅有一个脉动压力测点,试验数据有限,因此燃烧室压力脉动特性还需要在全环燃烧室和真实声学边界条件下开展试验或计算研究确定。

Table 3 Main frequency/Hz

	Base	g1	g2	g3	g4	g5
C1	/	524	510	510	505	-
C2	540	537	550	570	560	/
C4	/	/	/	/	/	/



(a) δ_p of test condition C1



(b) δ_p of test condition C2

Fig. 11 δ_p test result

3.7 主燃级各设计参数对燃烧性能影响小结

表 4 列出了各个参数增加时燃烧效率和 NO_x 排放的变化趋势, $\nearrow$ 为增加, $\searrow$ 为减小,-为无明显变化。

燃油停留时间对燃烧效率影响最大,旋流数对燃烧效率也有一定的影响,喷点个数和级间距对燃烧效率的影响主要体现在进口温度低的小状态下;级间距和喷点个数对 NO_x 排放影响最大,旋流数和燃油停留时间对 NO_x 排放影响较小。在本次研究的试验方案中级间距变化对燃烧稳定性的表现有明显的影

Table 4 Main mixer parameters influence

Parameter	η_c	EI_{NO_x}
SN	↗	—
Nozzle number	↘	↘↘
Fly time	↗↗	—
Gap	↘	↘↘

4 结 论

本文分析了影响中心分级燃烧室性能的关键因素并设计了多个主燃级方案和试验方案,开展了试验和分析,研究表明:

(1)对于中等以上旋流强度的主燃级,增加旋流数可以进一步加强燃油与空气的掺混,加强燃油的雾化和蒸发,进而提升燃烧效率,但提升有限。旋流数增加时 NO_x 排放变化很小。

(2)主燃级的燃油喷点数量多,燃油分布均匀,燃烧产生的 NO_x 更少;带来的不利影响是在进口温度较低的情况下,由于此时发动机供油量小、燃烧室油气比较低,燃油分布越均匀局部油气比越低,燃烧效率明显降低。

(3)级间距影响预燃级和主燃级火焰的互相作用,级间距大则主燃级火焰相对独立,在进气温度低的条件下,容易造成燃烧效率下降,但在大状态下 NO_x 排放更低。另外,级间距是对火焰筒内脉动压力影响最大的设计参数。

(4)本次试验设计的方案燃油停留时间变化范围较小,在此范围内燃烧效率随燃油停留时间增加而有所提升但变化不大, NO_x 排放没有明显的变化。

受限于试验件和试验台资源情况,主燃级设计对燃烧稳定性的影响未开展详细研究;对燃烧室出口温度分布、点火及熄火性能未开展试验,有待继续研究。

参考文献

[1] Hukam C Mongia, TAPS-A 4th Generation Propulsion Combustor Technology for Low Emissions [R]. AIAA 2003-2657.

[2] Holger Klinger, Waldemar Lazik, Thomas Wunderlich. The Engine 3E Core Engine[R]. ASME GT 2008-50679.

[3] Lee Chi-ming, Chang Clarence. NASA Project Develops Next Generation Low-Emissions Combustor Technologies [R]. AIAA 2013-0540.

[4] 颜应文,李红红,赵坚行,等. 双环预混旋流低污染燃烧室数值研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9):

1923-1929.

[5] 邓远灏,颜应文,朱嘉伟,等. LPP 低污染燃烧室两相喷雾燃烧数值研究[J], 推进技术, 2013, 34(3): 353-361. (DENG Yuan-hao, YAN Ying-wen, ZHU Jia-wei, et al. Numerical Study of Two-Phase Spray Combustion for Lean Premixed Prevaporized Low-Emission Combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(3): 353-361.)

[6] 刘 威,王成军,郑 顺,等. 旋流器结构参数对燃烧室燃烧性能影响的数值分析[J]. 燃气轮机试验与研究, 2020, 33(1): 19-26.

[7] 王智勇,王 波,韩 啸,等. TeLESS II 低排放燃烧室预燃级设计对排放的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1561-1568.

[8] 付镇柏,林宇震,张 弛,等. 中心分级燃烧室预燃级燃烧性能试验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 26-52.

[9] 李海涛,许全宏,付镇柏,等. 中心分级燃烧室预燃级贫油熄火性能试验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2188-2192.

[10] 林宇震,刘高恩. 分级/预混合预蒸发贫油燃烧低污染方案排放初步研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 4922-4971.

[11] 何 沛,邓向阳,鄂亚佳,等. 低排放燃烧室 NO_x 排放试验及预测方法研究[J]. 推进技术, 2019, 40(12): 2762-2770. (HE Pei, DENG Xiang-yang, E Ya-jia, et al. NO_x Emission Test and Prediction Method for Low Emission Combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(12): 2762-2770.)

[12] 张 川,索建秦,金如山. 民用飞机低污染燃烧室的技术成熟度划分[J]. 航空工程进展, 2010, 1(1): 85-89.

[13] Greenhough V W, Lefebvre A H. Some Applications of Combustion Theory to Gas Turbine Development [C]. London: Six Symposium on Combustion, 1957.

[14] Anderson D. Effects of Equivalence Ratio and Dwell Time on Exhaust Emissions from an Experimental Premixing Prevaporizing Burner[R]. ASME 75-GT-69.

[15] Leonard G, Stegmaier J. Development of an Aeroderivative Gas Turbine Dry Low NO_x Emissions Combustion System [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116: 542-546.

[16] Lyons V J. Fuel/Air Nonuniformity-Effect on Nitric Oxide Emissions[J]. AIAA Journal, 1982, 20(5): 660-665.

[17] Lee Chi-ming, Chun Kue S. Fuel-Air Mixing Effect on NO_x Emissions for Lean Premixed-Prevaporized Combustion System[R]. AIAA 94-0729.

(编辑:张 贺)