

中心分级燃烧室变频变能点火性能试验

黄兵, 邱伟, 房人麟, 张杰, 谭航

(中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 对中心分级燃烧室常温常压下变频变能点火性能进行了试验研究, 点火能量为 1~15 J, 点火频率为 1~15 Hz, 燃烧室压降 1.5%。结果表明: 随着点火能量增大, 贫油点火余气系数先迅速增大后缓慢增大, 点火延迟时间先急剧缩短后缓慢缩短, 随点火频率增大, 贫油点火余气系数缓慢增大, 点火延迟时间先迅速缩短后缓慢缩短, 点火能量较低时该规律更为显著; 当点火功率大于 35 W 时提高点火功率对提高点火性能意义不大, 点火能量对点火性能的影响较点火频率更为显著, 相同功率下提高点火能量对点火更有利; 基于 Lefebvre、王延胜等人的点火模型, 拟合了中心分级燃烧室关于燃烧室参考速度、索太尔平均直径、点火能量和点火频率的点火模型, 模型预测误差在 $\pm 10\%$ 以内。

关 键 词: 中心分级燃烧室; 点火性能; 点火能量; 点火频率; 点火模型

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on variable-frequency-energy ignition performance of internally-staged combustor

HUANG Bing, QIU Wei, FANG Renlin, ZHANG Jie, TAN Hang

(Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: At ambient temperature and pressure, the ignition performance of the internally-staged combustor under different ignition energy and ignition frequency combinations was experimentally investigated. The ignition energy values ranged from 1 J to 15 J, the ignition frequency values ranged from 1 Hz to 15 Hz, and air pressure drop remained at 1.5%. The experimental results indicated that, as the ignition energy increased, the excess air coefficient of lean ignition increased rapidly at first and then increased slowly, while the ignition delay time was shortened sharply and then slowly. As the ignition frequency increased, the excess air coefficient of lean ignition increased slowly, and the ignition delay time was shortened rapidly and then slowly, this regularity was more pronounced at lower ignition energy. When the ignition power was greater than 35 W, increasing the ignition power had little significance to improve the ignition performance, and the ignition energy had more significant effect on ignition performance than ignition frequency; under the same ignition power, it was better to raise the ignition energy to improve the ignition performance. A model of ignition based on Lefebvre's and WANG Yansheng's ignition models was obtained by combustor reference velocity, Sauter mean diameter, ignition energy and ignition frequency, and the prediction error of the model was controlled within $\pm 10\%$.

收稿日期: 2018-06-01

作者简介: 黄兵(1988—), 男, 工程师, 硕士生, 主要从事航空发动机主燃烧室燃烧性能方面研究。E-mail: hbbhit1988@163.com

引用格式: 黄兵, 邱伟, 房人麟, 等. 中心分级燃烧室变频变能点火性能试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(3): 529-538. HUANG Bing, QIU Wei, FANG Renlin, et al. Experiment on variable-frequency-energy ignition performance of internally-staged combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(3): 529-538.

Key words: internally-staged combustor; ignition performance; ignition energy; ignition frequency; ignition model

低污染燃烧室和高油气比燃烧室是未来航空发动机的发展方向,一般而言,把低污染燃烧室和高油气比燃烧室统称为先进燃烧室。先进燃烧室采用的头部组织燃烧方式主要有贫油燃烧和富油燃烧两种模式,两种头部组织燃烧模式在保证燃烧效率条件下均可以使燃烧室污染物排放降低到排放标准以下^[1-2]。采用贫油燃烧模式的先进燃烧室大多采用中心分级组织燃烧技术,在燃烧室头部中心区域为预燃级,用以保证燃烧室的低工况稳定性,在预燃级外围为主燃级,保证燃烧室在高工况时的高效燃烧和低排放。为了平衡燃烧室高、低工况性能,相较于传统富油燃烧的头部,中心分级燃烧室头部进气量大得多,导致其头部高度增大,头部平均流速增加,进而导致燃油需要穿透的距离增加,电火花散热增加,给点火带来不利影响^[3]。在航空发动机工作边界内,燃烧室可靠点火关系到飞机飞行安全,提高中心分级燃烧室的点火性能意义重大。

航空发动机点火性能最重要的表征参数是贫油点火余气系数(α),贫油点火余气系数越大,点火边界越宽。点火延迟时间(t)也是表征燃烧室点火性能的参数,相同贫油点火余气系数下,点火延迟时间越短,发动机起动加速性越好。影响航空发动机燃烧室点火性能的主要因素有:燃油雾化质量、燃烧室进口温度、燃烧室进口压力、流场结构、火焰筒压降、点火位置、点火能量(E)、点火频率(F)等。目前对先进燃烧室的研究多集中于燃烧效率和污染排放,对点火性能的研究较少。颜应文、邓远灏等人^[4-5]对贫油预混预蒸发燃烧室的燃烧性能开展了研究,房人麟等人^[6]对中心分级的双级旋流多点喷射燃烧室燃烧性能开展了相关研究。林宇震等人^[7]研究了复合式收扩套筒空气雾化喷嘴在不同压降下的雾化质量,总结出了简单离心喷嘴的索太尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD)经验关系式,并在常温常压下开展点火试验,表明雾化质量对燃烧室点火性能有重要影响。王延胜等人^[8]研究了不同火焰筒压降下中心分级燃烧室的常温常压点火性能,发现在不同燃烧室进口压力下,贫油点火油气比具有一个最低值,随着进口压力减小,这个最低值所对应的压降不断降低,贫油点火油气比升高。付镇柏等人^[9]研究了不同台阶高度对中心分级燃烧室点

火性能的影响,研究发现增大台阶高度可以降低主燃级射流对预燃级的干扰,减少主燃级和预燃级之间的热交换,对点火有利。付镇柏等人^[10]还研究了点火位置对低污染燃烧室点火性能的影响,点火器分别位于距旋流器出口5个不同位置,试验结果表明点火位置对该燃烧室点火性能无显著影响,薛鑫等人^[11]也研究了火焰筒压降对点火特性的影响,研究结果表明低压力损失的火焰筒能在更宽的压力条件下点燃。上述对中心分级燃烧室点火性能的研究主要聚焦在燃油雾化质量、流场结构匹配等方面,未对点火系统对燃烧室点火性能的影响开展研究,而点火能量和点火频率关系到点火初始火焰核心的形成,对燃烧室点火性能有显著影响^[12]。燃烧室进口状态参数随飞行包线变化较大,对航空发动机来说,希望在不同环境下点火迅速可靠,点火系统体积小质量轻,电嘴使用寿命长,而这是矛盾的,点火系统功率越大,体积和质量越大,点火能量影响电嘴寿命,电火花能量减少25%能使电嘴寿命延长5倍^[13]。现役航空发动机点火系统的点火能量和点火频率大多根据经验来选定,点火能量和点火频率不可调节,这对拓宽发动机点火边界、延长电嘴使用寿命是不利的。

变频变能点火技术其目的在于在总体限定的体积和质量范围内,寻求不同环境下最佳的点火能量和点火频率组合,使得燃烧室贫油点火余气系数最大,点火延迟时间缩短,改善燃烧室点火性能,避免为过度追求点火可靠性而选用过大功率的点火系统,造成体积和质量的浪费,根据发动机的工作状态,调整点火参数,降低电源功率以减轻飞行器负担,延长电嘴使用寿命。而且变频变能点火技术利用半导体器件代替传统点火技术中的触点变压器、气体放电管等元器件,其产品的电磁兼容性、电源适应性、输出参数稳定性等均比传统的电点火装置有较大的提高。

本文研究了中心分级燃烧室在常温常压状态1.5%火焰筒压差下,点火能量和点火频率对点火性能的影响,拟合了点火模型,为中心分级燃烧室点火性能预估提供参考。

1 中心分级燃烧室

本文研究的燃烧室采用中心分级双级旋流多点喷射直接混合燃烧模式^[14](twin annular muti-

point direct injection mixing, TAMDIM), 头部示意图如图 1 所示。

该头部预燃级由离心喷嘴和一级轴向旋流器组成,位于头部中间,采用富油/贫油直接喷射燃烧(R/L DI combustion)模式,主燃级由周向均布的直射喷嘴和一级轴向旋流器组成,包裹在预燃级外围,采用富油直混燃烧(rich DM combustion)模式。预燃级和主燃级旋流器均采用弱旋流,旋向相反,离心喷嘴流量数为 $7\text{ g}/(\text{s} \cdot \text{MPa}^{0.5})$,头部进气量为 40%,火焰筒采用多斜孔冷却,点火时只离心喷嘴供油。

为 $0.15 \sim 0.45\text{ kg/s}$,精度为 $\pm 0.5\%$ 。燃烧室燃油流量采用质量流量计测量,量程为 $0 \sim 25\text{ g/s}$,精度为 $\pm 0.25\%$ 。经误差传递函数计算分析,贫油点火余气系数的精度为 $\pm 0.56\%$ 。

变频变能点火系统点火频率为 $1 \sim 15\text{ Hz}$,点火能量为 $1 \sim 15\text{ J}$,点火能量和点火频率只取整数,电嘴采用沿面电嘴,输入电压为 115 V 、 400 Hz ,输出电压为 $7 \sim 15\text{ kV}$,在输出功率 $E \times F < 230\text{ W}$ 范围内,可以维持点火能量和点火频率的稳定输出,变频变能点火系统如图 3 所示,工作原理如图 4 所示。

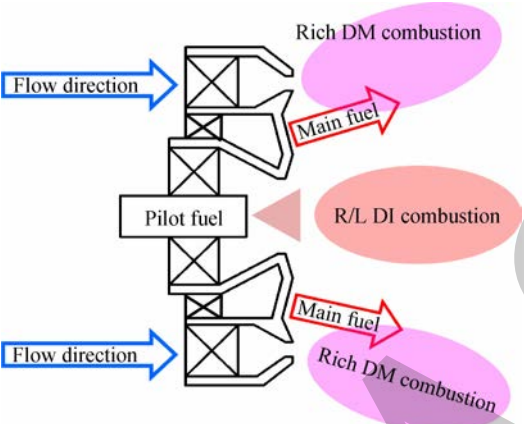


图 1 TAMDIM 燃烧室头部概念图

Fig. 1 TAMDIM combustor dome concept map

燃烧室点火位置位于头部出口下游 52.5 mm 处,电嘴与火焰筒壁面齐平,该单头部燃烧室数值计算结果表明点火电嘴位于主燃区低速回流区附近,燃油能够到达电嘴附近形成一定质量分数分布的油雾场,对点火有利。

2 试验系统

试验在中国航空发动机集团有限公司四川燃气涡轮研究院点火试验台上进行,燃烧室进口安装有 2 支 3 点复合的总温总压测量耙和 2 个静压测点,出口安装有 1 支 5 点总压耙、1 支 5 点总温耙和 1 个静压测点,总压与静压测量精度 $\pm 0.5\%$,温度测量精度 $\pm 1\%$,燃烧室出口排气管道设置有观察窗,单头部燃烧室试验台如图 2 所示。

总压与静压采用 16 通道 PSI 9116 智能压力扫描器测量,仪器量程为 15 PSI ,精度为 $\pm 0.05\% \text{ FS}$ (full scale);温度采用 16 通道 PSI 9146 智能温度扫描器测量,精度为 $\pm 1\%$ 。燃烧室空气流量采用标准孔板测量,通过测量孔板前压力、温度以及前后孔板压差获取燃烧室进口空气流量,量程

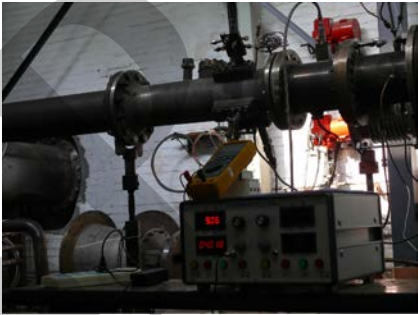


图 2 单头部燃烧室试验台

Fig. 2 Single annular combustor test rig



图 3 变频变能点火系统

Fig. 3 Variable-frequency-energy ignition system

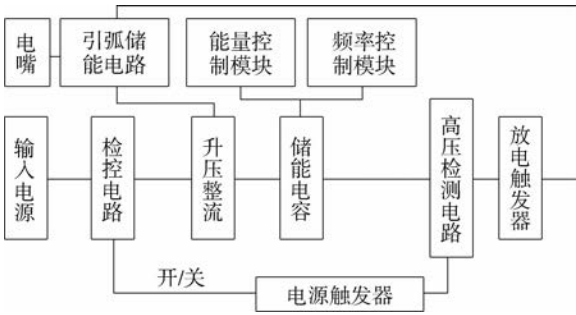


图 4 变频变能点火系统工作原理

Fig. 4 Variable-frequency-energy ignition system operating principle

变频变能点火系统工作原理为:输入的交流电通过检测控制电路,一路经过升压整流电路将输入的交流电以电场能的形式储存在主储能电容器中,一路经升压整流电路给引弧储能电容器充电,当主储能电容器两端的电压达到设计值时,高压检测电路就会产生一个关断信号,触发电源触发器切断输入电源,同时该信号触发放电触发器,使引弧储能电路感应出高压电击穿放电管和点火电嘴,此时放电管和电嘴相当于短路,储能电容器储存的能量在电嘴端部释放形成放电火花,电火花的能量和释放频率分别由能量控制模块和频率控制模块控制,当高压检测电路检测到放电完毕后,产生一个开通信号触发电源触发器,接通输入电源,这样电路周而复始循环工作。

该变频变能点火系统点火能量 $E=0.5CU^2$, 其中 C 为储能电容值, U 为电容两端电压。点火能量大部分在传输过程和放电过程中以辐射能、光能等形式耗散掉了,实际可用于点火的电火花能量只占到点火能量的约 15%,随着点火能量的增大,单个电火花的能量增大,点火频率 $F=1/(0.7rC')$,其中 r 为频率控制电路等效电阻阻值, C' 为频率控制模块对应的电容值。点火能量和点火频率控制模块相互独立控制,相同点火能量下,不同点火频率的电火花能量应相同。乔屹等人^[15]测试了点火能量分别为 1 J 和 2 J,点火频率为 4、6、8、10 Hz 时的电火花能量,发现在相同点火能量下,不同点火频率下电火花能量只在小范围内波动,差异不大,因此在试验时,认为相同的点火能量下,不同点火频率单个电火花的能量相差不大。

3 试验设计

在本试验中,点火能量和点火频率的组合共有 $15\times15=225$ 种,若全部安排试验是不现实的。正交试验设计是一种研究多因子、多水平的一种试验设计方法,根据正交性从全部因子的全部水平中选出部分具有代表性的点安排试验,这些被选中的点具有均匀分散、齐整可比的特点,综合考虑了单个因子的影响和多个因子间的交互影响,因此可以由部分因子来代表全因子的变化规律。正交试验设计可以有效降低试验规模,缩短试验周期,降低试验成本,根据试验结果分析影响因子对响应变量影响的 P 值,可以确定哪些影响因子是主要的 ($P\leq0.05$),哪些影响因子是次要的 ($P>0.05$),从而找准关键影响因子,通过因子效

应图可以定性分析影响因子与响应变量之间的变化关系,从而优化影响因子组合参数。关于正交试验设计的原理见文献[16]。本文利用 Minitab 17 软件设计了点火能量和点火频率的部分因子正交试验,其目的在于:①合理设计试验,缩短试验时间,控制试验成本;②找出点火能量和点火频率对点火性能的影响规律,确定关键影响因子;③拟合出点火能量和点火频率对贫油点火余气系数的预测模型,提供工程指导。为更加准确的捕捉点火能量和点火频率对点火性能的影响,便于对比分析,综合考虑试验时间和成本,在正交试验设计方案上增加了 6 组试验点,试验的点火能量和点火频率组合如表 1 所示,其中点火能量 9、11、5 J 的组合为补充的试验点。

表 1 点火能量和点火频率组合
Table 1 Combinations of ignition energy and ignition frequency

E/J	F/Hz	E/J	F/Hz
13	3	8	1
8	8	3	3
1	8	9	1
8	8	9	4
8	15	9	7
3	13	11	3
15	8	5	7
13	13	5	9

点火试验按如下进行:燃烧室进口压力为 99.5 kPa,燃烧室进口温度为 293 K,火焰筒压降为 1.5%,上述状态参数试验时保持不变,选定点火能量和点火频率后,调节离心喷嘴供油量,使燃烧室点燃,然后逐步减少供油量,进行点火,当燃烧室不能点燃时,再逐步增大供油量,使燃烧室能在某贫油点火余气系数附近重复点燃 3 次,再稍微减少供油量,燃烧室不能点燃,则认为找到该状态的点火边界,贫油点火余气系数取 3 次试验的算术平均值,点火延迟时间为发出点火信号到燃烧室出口温度急剧上升时的时间间隔。点火试验时点火时间为 10 s,两次点火时间间隔 5 min。点火成功的判定标准为:燃烧室出口温升大于 80 K,且在尾部观察窗观察到火焰。

4 试验结果及讨论分析

本文采用试验设计方法,录取了常温常压

1.5%火焰筒压差下,不同点火能量和点火频率组合时中心分级燃烧室的贫油点火余气系数和点火延迟时间。

4.1 试验设计方差分析

根据试验结果,对点火能量和点火频率对贫油点火余气系数的影响进行方差分析(拟合优度 $R^2=91.65\%$),如表 2 所示。

表 2 方差分析
Table 2 Analysis of variance

参数	自由度	离均平方和	均方差	P
E	1	1.972	1.972	<0.001
F	1	0.099	0.099	0.082

从表 2 可知,点火能量对贫油点火余气系数的 P 值小于 0.05,说明点火能量对贫油点火余气系数的影响显著,是影响贫油点火余气系数的关键影响因子,点火频率对贫油点火余气系数的 P 值为 0.082,略大于 0.05,说明点火频率对贫油点火余气系数有影响,但不是关键影响因子。在给定的研究条件下,点火能量和点火频率对贫油点火余气系数的影响占到 91.65%。

4.2 点火能量对点火性能的影响

点火能量对贫油点火余气系数的因子效应图如图 5 所示,相同点火频率下,燃烧室贫油点火余

气系数随点火能量的变化如图 6 所示,点火延迟时间随点火能量的变化如图 7 所示。

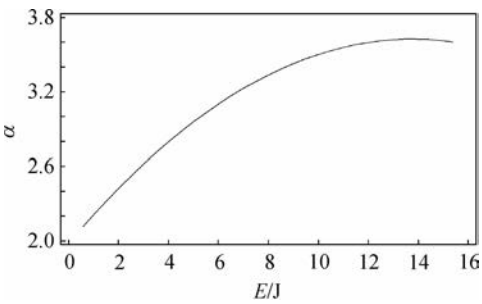


图 5 点火能量因子效应图

Fig. 5 Factor effect map of ignition energy

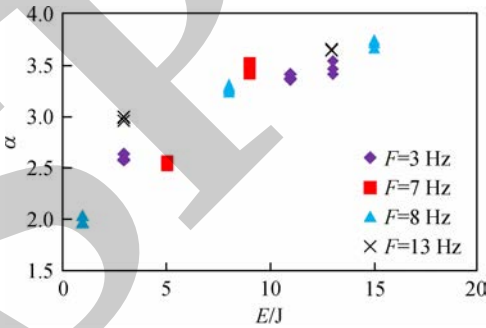


图 6 点火能量对贫油点火余气系数的影响

Fig. 6 Effect of ignition energy on excess air coefficient of lean ignition

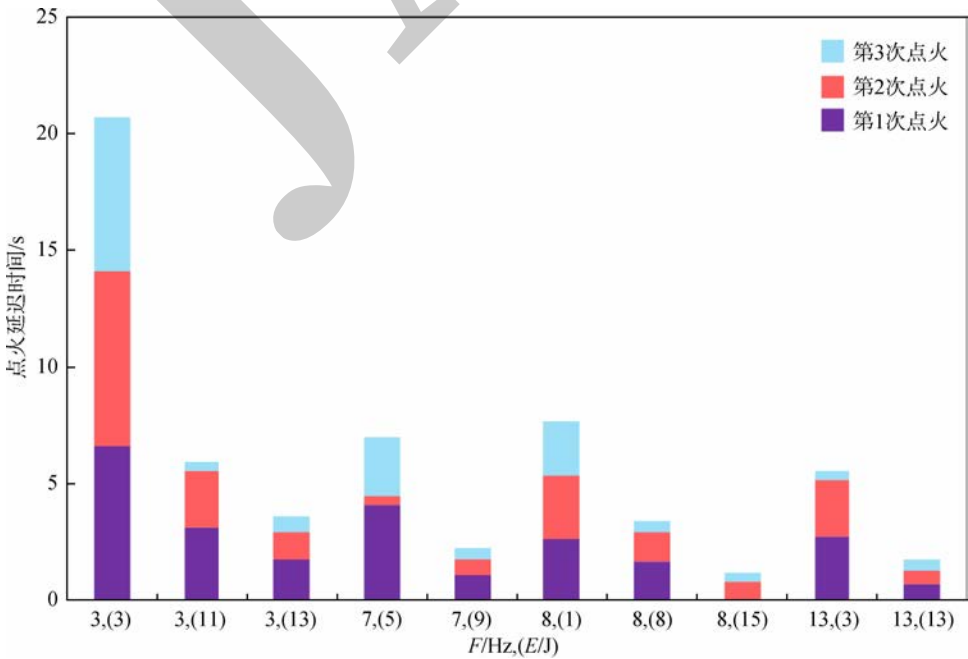


图 7 点火能量对点火延迟时间的影响

Fig. 7 Effect of ignition energy on ignition delay time

由图 5 可以看出,点火能量与贫油点火余气系数呈非线性关系,随着点火能量的增大,贫油点火余气系数先显著增大,当点火能量增大到 10 J 以后,随着点火能量增大,贫油点火余气系数缓慢增大。图 6 不同频率时贫油点火余气系数随点火能量的变化规律与图 5 相同,以 8 Hz 点火频率为例,当点火能量从 1 J 增大到 8 J 时,贫油点火余气系数增大了 64.7%,而当点火能量从 8 J 增大到 15 J 时,贫油点火余气系数增大了 13.1%。图 7 点火能量对火延迟时间的影响则表明,相同点火频率下,随着点火能量的增大,点火延迟时间先急剧缩短后缓慢缩短,该规律对于点火能量和点火频率均较低时尤为明显,以 3 Hz 点火频率为例,点火延迟时间取 3 次点火延迟时间的平均值,当点火能量由 3 J 增大到 11 J 时,点火延迟时间缩短了 250.3%,当点火能量由 11 J 增大到 13 J 时,点火延迟时间缩短了 63.6%。

点火能量对点火性能的影响作如下解释:

根据点火理论,对单头部燃烧室来说,点火分为两个阶段:第一阶段在点火电嘴附近形成一个高温火焰核心,第二阶段该火焰核心将火焰传播到整个燃烧室,必须要两个阶段同时完成,点火才能算成功^[12]。对第一阶段而言,形成的高温火焰核心温度要足够高,尺寸要足够大,火焰核心的尺寸对点火性能有很大影响。火焰核心的形成经历了两个阶段,首先电火花电离,形成一个初始的能量火核,随后火核依靠燃料燃烧放热形成足够的释热率维持火核的稳定和增长。火焰核心的尺寸主要取决于电火花能量和电嘴附近的有效燃油蒸气质量分数,点火能量越大,电嘴释放的单个电火花的能量越大,电离速度越快,形成的初始火焰核心尺寸越大,李从心^[17]研究了电火花能量对煤层气电离速度的影响,发现当电火花能量由 12.8 mJ 降低到 2.5 mJ 后电离速度下降了 3.4 倍。有效燃油蒸气质量分数越接近化学当量比,化学反应速率越快,释热率越高,火焰核心尺寸越大。有效燃油蒸气质量分数跟燃油雾化质量有关,燃油雾化质量用索太尔平均直径表征,索太尔平均直径越小,燃油初始蒸发率越高,对离心式喷嘴,在喷嘴压降较低时,增大供油量能使索太尔平均直径显著降低,当喷嘴的压降完全建立,进一步增大供油量,索太尔平均直径几乎维持不变。对于一定状态下的燃烧室,在点火能量较小时,随着点火能量的增大,一方面电火花的尺寸显著增大,另一方面虽然减少了燃油的供应量,燃油的雾化变差,初

始燃油蒸气质量分数降低,但电火花可以提供更多的能量给电嘴附近的燃油液滴使其进一步蒸发,使电嘴附近燃油蒸气质量分数增加,这两方面综合作用使得初始火焰核心的尺寸显著增大,可以维持第一阶段的点火,因此,随着点火能量的增大,贫油点火余气系数显著增大,当点火能量增大到一定程度时,火焰核心的大小已足够大,此时制约点火成功的关键在于点火的第二阶段,增大点火能量带来的增益减小,因此随着点火能量的提高,贫油点火余气系数只是略有增长。

点火延迟时间分为物理延迟时间和化学延迟时间两部分,物理延迟时间是指燃油蒸发与空气混合至可燃比例的时间间隔,化学延迟时间是指可燃混合物出现至出现火焰的时间间隔。对于雾化较好的航空煤油喷入压力较低的气流中时,其燃油蒸发时间可忽略^[13],在相同点火频率下,可近似认为其物理延迟时间相同。Lefebvre 等人^[13]归纳总结了化学延迟时间的经验关系,发现 $t \propto \varphi^{-0.73} \exp(E_m/RT)$, φ 为当量比, E_m 为活化能, T 为可燃物的初始温度。当点火能量增大时,初始火焰核心的尺寸和温度增大,火焰核心周围可燃混气的初始温度升高,活化分子百分数增多,化学反应速率加快, $\exp(E_m/RT)$ 项降低,虽然随着点火能量的增大当量比降低了, $\varphi^{-0.73}$ 项值增大,但其影响远小于 $\exp(E_m/RT)$,因此在两项的相互作用下,随着点火能量的提高点火延迟时间缩短,特别是点火能量较小时,提高点火能量时火焰核心尺寸和温度增加明显,可燃物温度增加较多,活化分子百分数大幅增加,点火延迟时间急剧缩短,当点火能量提高到一定程度时,化学延迟时间缩短有限,物理延迟时间占比增加,因此点火能量进一步提升时点火延迟时间缩短变缓。

4.3 点火频率对点火性能的影响

点火频率对贫油点火余气系数的因子效应图如图 8 所示,相同点火能量下,燃烧室贫油点火余气系数随点火频率的变化如图 9 所示,点火延迟时间随点火频率的变化如图 10 所示。

从图 8 可知,点火频率与贫油点火余气系数呈线性关系,随着点火频率提高,贫油点火余气系数缓慢增大。图 9 显示不同点火能量下贫油点火余气系数随点火频率的变化与图 8 趋势一致,从图 9 还可以看出当点火能量较低时,提高点火频率对贫油点火余气系数的影响更大。当点火能量为 3 J 时,点火频率由 3 Hz 提高到 13 Hz,贫油点

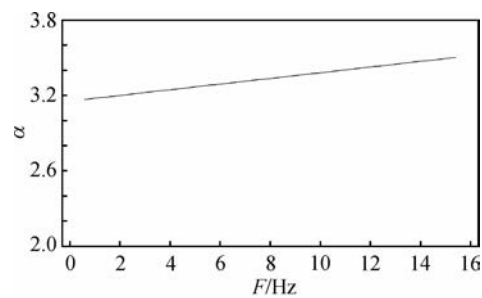


图 8 点火频率因子效应图

Fig. 8 Factor effect map of ignition frequency

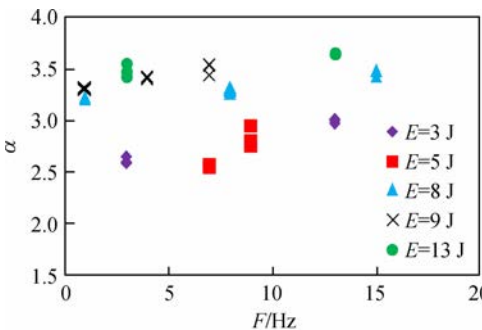


图 9 点火频率对贫油点火余气系数的影响

Fig. 9 Effect of ignition frequency on excess air coefficient of lean ignition

火余气系数提高了 14.7%，而当点火能量为 13 J 时，点火频率由 3 Hz 提高到 13 Hz，贫油点火余气系数只提高了 4.7%。从图 10 可以看出，相同点火能量时，提高点火频率，点火延迟时间缩短，在点火能量较小时，时间缩短尤为明显，当点火能量为 3 J 时，点火频率由 3 Hz 提高到 13 Hz，点火延迟时间缩短了 271.9%，而当点火能量为 13 J 时，

点火频率由 3 Hz 提高到 13 Hz，点火延迟时间缩短了 1 倍。

点火频率对点火性能的影响作如下解释：

如上文分析，单头部燃烧室点火共分为两个阶段，第一阶段火焰核心的形成主要受点火能量和燃油雾化质量的影响，电嘴的能量释放率 $Q=\eta\times E\times F$ ，其中 η 为点火电嘴能量转化率，对本点火系统约为 15%，当点火能量一定，点火频率提高，电嘴的能量释放率提高，当点火频率由 3 Hz 提高到 13 Hz 时，能量释放率提高了约 4 倍，这其中大部分释放的热量很快被气流带走，其余部分能量使电嘴附近的混气温度升高，燃油蒸气质量分数提高，初始火焰核心尺寸增大，完成点火第一阶段的能力增强，因此贫油点火余气系数提高。当点火能量较低时，单个电火花能量较低，容易被气流吹熄，提高点火频率使单位时间内电嘴附近的释热率增加，更有利于初始火焰核心存活，因此贫油点火余气系数有较大提高，而当点火能量较大时，初始的火焰核心尺寸已足够大，较宽范围的燃油蒸气质量分数均可以维持火焰核心自持，提高点火频率对于提高其存活概率增益不大，因此贫油点火余气系数只有略微增大。

点火频率对点火延迟时间的影响在于：如上文分析，提高点火频率时，单位时间内积聚的能量增多，电嘴附近的可燃物混气温度升高，有效燃油蒸气质量分数范围变宽，活化分子百分数增加，使得化学反应时间和物理延迟时间均有所缩短，因此，随着点火频率的提高点火延迟时间缩短。当点火能量较小时，初始火焰核心尺寸较小，更依赖

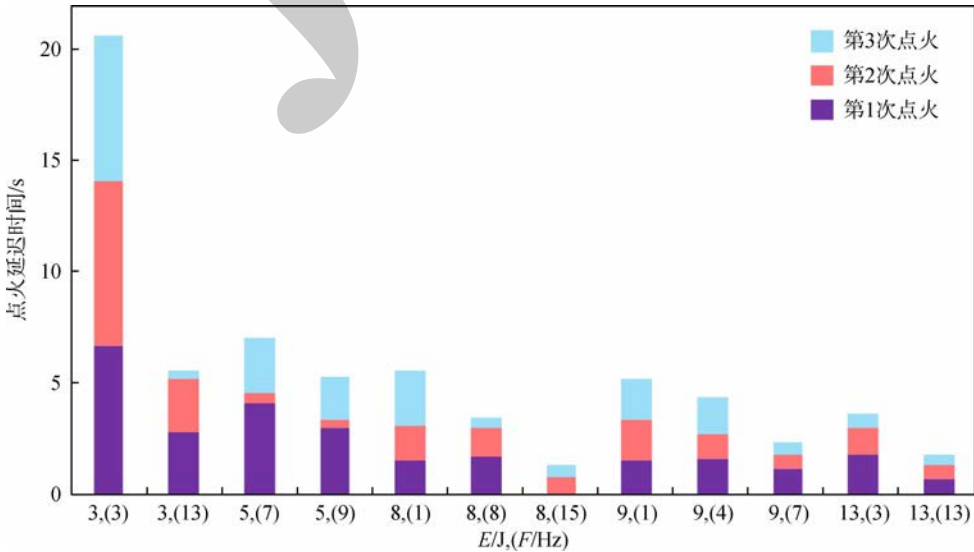


图 10 点火频率对点火延迟时间的影响

Fig. 10 Effect of ignition frequency on ignition delay time

于找到有效燃油蒸气质量分数区域维持足够的释热率,此时电嘴附近混气温度低,有效燃油蒸气质量分数区域较窄,化学反应延迟时间长,随着点火频率的提高,电嘴释热率增大,有利于燃油进一步蒸发,拓宽有效燃油蒸气质量分数区域,使得物理延迟时间迅速缩短,同时化学反应延长时间也有所缩短,因此点火延迟时间缩短较为迅速。当点火能量足够大时,初始火焰核心尺寸足够大温度足够高,有效燃油质量分数区域范围很宽,此时进一步提高点火频率时物理延迟时间缩短缓慢,化学延迟时间基本不变,因此点火延迟时间缩短不如能量较低时显著。

4.4 点火功率对点火性能的影响

点火系统的体积和质量与点火功率正相关,点火功率为点火能量和点火频率的乘积,不同点火功率时燃烧室的贫油点火余气系数如图 11 所示。

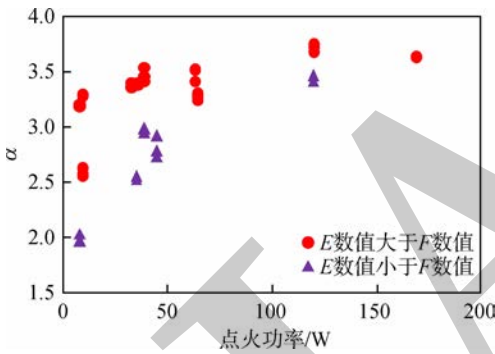


图 11 点火功率对贫油点火余气系数的影响
Fig. 11 Effect of ignition power on excess air coefficient of lean ignition

从图 11 可知,当点火功率较小时,随着点火功率的增大,贫油点火余气系数增大,当点火功率大于 120 W 时,增大点火功率,贫油点火余气系数基本维持不变,当点火功率在 35 W 左右时,贫油点火余气系数已有足够的增益,继续增大点火功率对提高贫油点火余气系数意义不大。从图 9 还可以看出,相近点火功率时, E 数值大于 F 数值的组合贫油点火余气系数明显大于 E 数值小于 F 数值的组合,13 J、3 Hz 的组合比 3 J、13 Hz 的组合点火余气系数增大 16.8%。这与上文分析的点火能量和点火频率对贫油点火余气系数的影响方式有关,点火能量显著影响初始火核的形成和尺寸大小,而点火频率只能稍微影响火核大小,从试验结果方差分析和因子效应图也可看出点火能量对贫油点火余气系数的影响比点火频率要大得

多,点火能量是影响贫油点火余气系数的关键因素,相同点火功率下,提高点火能量对点火更有利。

4.5 点火模型拟合

Lefebvre 等人^[13]归纳总结出了点火模型的半经验关系式,如公式(1)所示。

$$R_{fa} = \frac{B}{V_c} \cdot \frac{m}{p_3^{1.5} \exp(T_3/300)} \cdot \frac{D_{sm}^2}{\lambda H} \quad (1)$$

式中 R_{fa} 为贫油点火油气比, B 为常数,与燃烧室几何结构尺寸等有关, V_c 为燃烧室主燃区容积, m 为进口空气流量, p_3 为燃烧室进口压力, T_3 为燃烧室进口温度, D_{sm} 为燃油的索太尔平均直径, λ 为燃油有效蒸发量, H 为燃油低位热值。该经验关系式第一部分主要考虑了燃烧室类型和容积,第二部分主要考虑了燃烧室的气动热力状态参数,第三部分主要考虑了燃油的雾化质量。

公式(1)中未将点火能量和点火频率的影响考虑进去。分析 Lefebvre 提出的点火模型,燃烧室进口空气流量和主燃区容积主要影响燃烧室参考速度 V_r ,王延胜等人^[8]基于 Lefebvre 的点火模型拟合了中心分级燃烧室点火模型,发现 $R_{fa} \propto (V_r^2 D_{sm}^2)^{-0.559}$,将其应用推广到本燃烧室,本文研究范围限定在常温常压下,因此将 $p_3^{1.5} \exp(T_3/100)$ 整合到常数项中,燃料参数主要考虑索太尔平均直径的影响,索太尔平均直径采用文献[13]中离心喷嘴的经验关系式计算,如公式(2)所示。

$$D_{sm} = 2.25 \sigma_i^{0.25} \mu_i^{0.25} m_i^{0.25} p_i^{-0.5} \rho_a^{-0.25} \quad (2)$$

在本文研究条件下,公式(2)中燃油表面张力系数 $\sigma_i = 0.025$ N/m,运动黏度 $\mu_i = 0.0012$ kg/(m·s)^[18], m_i 为燃油流量, p_i 为燃油供油压差, ρ_a 为进口空气密度。基于 Lefebvre 和王延胜等人的点火模型,拟合出了燃烧室关于点火能量和点火频率的点火模型,如公式(3)所示。

$$R_{fa} = 31.79 (V_r^2 D_{sm}^2)^{-0.559} \cdot \exp(-0.1446 E^{0.18} F^{0.03}) \quad (3)$$

该经验公式的 $R^2 = 0.99$,置信度为 95%,适用范围为:常温常压, $E = 1 \sim 15$ J, $F = 1 \sim 15$ Hz。为验证公式(3)在其他状态下的符合性,在本单头部燃烧室上,调整火焰筒压降为 1.5%、2.5%、3.5%,点火能量和点火频率取常用的 12 J、2 Hz,开展常温常压点火试验,试验值与预测值对比如图 12 所示。

从图 12 可以看出,在 1.5% 火焰筒压差时,预测值与试验值符合性较好,相对误差为 2.8%,随着火焰筒压差增大,相对误差逐渐增大,在

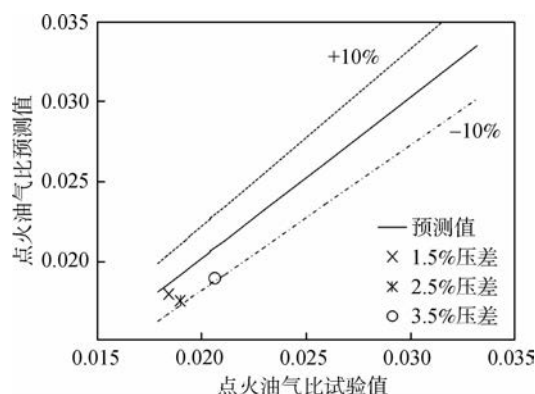


图12 试验值与预测值对比

Fig. 12 Test values compared with the predicated values

3.5%火焰筒压差时,相对误差为8.3%,这主要是由于该公式是在1.5%火焰筒压差下拟合,相同压差下,燃烧室流场结构相似,除点火能量和点火频率以外的其他影响因子对点火性能的作用相差不多,因此在1.5%火焰筒压差时符合性较好,随着火焰筒压差的增大,燃烧室参考速度逐渐增加,一方面散热作用变得更为显著,另一方面空气对燃油的雾化作用增强,计算的索太尔平均直径与实际的索太尔平均直径偏差增大,因此预测值与试验值的偏差逐渐增大。总的来看,在燃烧室点火常用的1.5%~3.5%火焰筒压差内,该模型预测的误差不超过 $\pm 10\%$ 。

5 结 论

本文研究了中心分级燃烧室在常温常压下,不同点火能量和点火频率时的点火性能,得到以下结论:

1) 点火能量是影响贫油点火余气系数的关键因素,随着点火能量增大,贫油点火余气系数迅速增大,点火延迟时间快速缩短,当点火能量大于10J时,随着点火能量增大,贫油点火余气系数缓慢增大,点火延迟时间缓慢缩短。

2) 随着点火频率的提高,贫油点火余气系数缓慢增大,点火延迟时间显著缩短,在点火能量较小时点火频率对点火性能的影响更为显著。

3) 贫油点火余气系数随点火功率的增大先增大后基本维持不变,当点火功率达到35W时继续提高点火功率对拓宽点火边界效果不明显,点火能量对点火性能的影响较点火频率更为显著,相同点火功率时提高点火能量对点火更有利。

4) 本文拟合了常温常压下中心分级燃烧室关于燃烧室参考速度、索太尔平均直径、点火能量

和点火频率的点火模型,预测误差在 $\pm 10\%$ 以内。

参考文献:

- [1] MONGIA H C. TAPS: a 4th generation propulsion combustor technology for low emissions [R]. AIAA-2003-2657, 2003.
- [2] SCHWEITZER J K. Propulsion technology readiness for next generation transport systems [R]. AIAA-2003-2787, 2003.
- [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] 颜应文,党龙飞,邓远灏,等. LPP低污染燃烧室单头部燃烧性能试验[J].航空动力学报,2015,30(4):814-822.
YAN Yingwen, DANG Longfei, DENG Yuanhao, et al. Experiment of combustion performance in LPP low emission combustor with single dome [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(4): 814-822. (in Chinese)
- [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 Yuanhao, YAN Yingwen, ZHU Jiawei, 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. (in Chinese)
- [6] 房人麟,邱伟,邓远灏,等.双级旋流多点喷射燃烧室试验研究[J].推进技术,2016,37(7):1720-1726.
FANG Renlin, QIU Wei, DENG Yuanhao, et al. Experimental investigation of twin annular multi-point direct injection mixing combustor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(7): 1720-1726. (in Chinese)
- [7] 林宇震,林培华,许全宏,等.复合式收扩套筒空气雾化喷嘴燃烧室点火研究[J].航空动力学报,2007,22(3):342-346.
LIN Yuzhen, LIN Peihua, XU Quanhong, et al. Research on ignition performance of a hybrid airblast atomizer combustor with convergent divergent sleeve [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 342-346. (in Chinese)
- [8] 王延胜,林宇震,李林,等.中心分级燃烧室点火性能试验研究[J].推进技术,2016,37(1):98-104.
WANG Yansheng, LIN Yuzhen, LI Lin, et al. Experimental investigation on ignition performance of internally-staged combustor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(1): 98-104. (in Chinese)
- [9] 付镇柏,林宇震,傅奇慧,等.不同台阶高度对中心分级燃烧室点火熄火性能的影响[J].航空动力学报,2014,29(5):1062-1070.
FU Zhenbo, LIN Yuzhen, FU Qihui, et al. Effect of different step heights on ignition and blowout performance of internally-staged combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(5): 1062-1070. (in Chinese)
- [10] FU Zhenbo, LIN Yuzhen. Experimental investigation on ignition performance of LESS combustor [R]. ASME Paper GT2011-45786, 2011. (in Chinese)

[11] 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.
XUE Xin,LIN Yuzhen,ZHANG Chi,et al. Effects of liner pressure loss on combustor ignition performances [J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(10):2229-2235. (in Chinese)

[12] 林宇震,许全宏,刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[13] LEFEBVRE A H,BALLAL D R. Gas turbine combustion alternative fuels and emissions[M]. 3rd ed. New York: Taylor and Francis Group,2010.

[14] 房人麟. 一种富油直混分区燃烧室:201320809412. 0[P]. 2014-08-06.

[15] 乔屹,赵军,张涛,等. 点火系统不同储能下点火频率稳定性研究[J]. 机械工程与自动化,2016(3):169-170,172.
QIAO Yi,ZHAO Jun,ZHANG Tao,et al. Ignition frequency stability of ignition system with different stored energy[J]. Mechanical Engineering and Automation,2016(3):169-170,172. (in Chinese)

[16] 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[17] 李从心. 发动机燃用低热值气体燃料燃烧性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
LI Congxin. The research on the combustion characteristics of the engine fueled with LHV gas[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2010. (in Chinese)

[18] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册:第10卷 燃料与润滑材料 纺织材料[M]. 第2版. 北京:中国标准出版社,2001.

(编辑:叶 青)