

蒸发管供油的单驻涡燃烧室贫油点火试验^{*}

邢 菲¹, 樊未军², 张荣春², 杨茂林²

(1. 浙江大学 航空航天大学, 浙江 杭州 310027)

2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 针对一种采用蒸发管供油的矩形单驻涡燃烧室试验段, 采用高能电嘴直接点火方式, 通过改变电嘴位置, 电嘴深入到凹腔深度和电嘴能量, 在不同主流工况下进行点火试验, 找出针对特定结构和进气方式驻涡燃烧室的最佳点火位置。试验结果表明: 这种结构的单涡燃烧室在主流温度 623~723 K, 马赫数 0.3~0.55 范围都可以点火成功; 主流温度增高以及电嘴能量增大有利于点火; 电嘴深入凹腔深度增加并不能一定有利于点火; 不同的点火位置表现出了不同的点火规律。

关键词: 驻涡燃烧室; 蒸发管; 高能电嘴; 贫油点火

中图分类号: V235.113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2009) 05-0523-05

Ignition performance of a single trapped vortex combustor with evaporation tube as fuel supply

XING Fei¹, FAN Wei-jun², ZHANG Rong-chun², YANG Mao-lin²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang Univ., Hangzhou 310027, China)

2. National Key Laboratory of Aircraft/College of Energy and Power Engineering

Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract To investigate the lean ignition performance of a new single trapped vortex combustor, experiments have been employed in variety inlet conditions, different spark positions, and different spark energy. The results indicate that as Ma of inlet conditions varies from 0.3 to 0.55, and temperature from 623~723 K, this type combustor can ignite successfully. Higher inlet temperature will be helpful for ignition. The effect of increasing depth of spark is not as good as expected. The disciplinary of ignition for different positions is not the same.

Key words Trapped vortex combustor; Evaporation tube; Spark ignitor; Lean ignition

1 引 言

从 1988 年美国提出的 HPTET 计划中公布了研究中的驻涡燃烧室 (Trapped Vortex Combustor) 方案开始, 美国驻涡燃烧室的研究到目前为止已经发展到第四代, 从最初的使用气体燃料到更接近真实应用的以煤油作燃料, 从理论研究到接近实际工程应用。美国的公开研究结果表明 TVC (Trapped Vortex Combustor) 具有较低的贫油熄火极限以及良好的高空再点火能力^[1]。

蒸发管供油方式在半个世纪时间里一直为航空发动机燃烧室所采用^[2], 它结构简单, 重量轻, 能克服压力雾化喷嘴易出现的壁温高冒烟以及排气污染严重等弊端。因此直到今天, 蒸发管供油方式仍在高性能发动机上采用, 例如推重比 8 的大发动机 RB199, 推重 10 的 EJ200 等, 高性能小发动机 RTM 322 等也予采用^[3]。

目前国内对驻涡燃烧室开展的试验研究采用的供油方式包括空气雾化喷嘴和蒸发管^[4~6]。本课题组一直进行研究的驻涡燃烧室供油采用的蒸发管结构。因为空气雾化喷嘴和离心喷嘴燃油喷射长度较

* 收稿日期: 2008-09-23 修订日期: 2008-12-22

作者简介: 邢 菲 (1980—), 男, 博士生, 研究领域为燃烧与推进技术, 新能源开发与应用。

E-mail: Effie@sjp.buaa.edu.cn

长,在尺寸较小的凹腔内喷射容易使得燃油喷射到壁面.造成局部温度过高.同时进行专门设计喷嘴成本也较高;而蒸发管结构简单,制造成本低,并且使用方便;结合驻涡燃烧室自身进气温度较高的特点可以使燃油充分蒸发获得良好的点火特性。

本文是在课题组前面研究的基础上,重新设计更接近实际应用的三头部单驻涡燃烧室,并且专门组织点火试验,对改变电嘴位置,电嘴深入到凹腔深度和电嘴能量对点火性能的影响进行研究。

2 试验系统

2.1 试验件

单驻涡燃烧室矩形试验件采用进气一体式设计(见图 1):进口的高温高速气流分别进入主流和冷却腔,进入冷却腔的气体占总气量的 40%,主流占 60%。进入冷却腔的气体一部分(占冷却腔内总进气的约 10%)通过冲压作用进入蒸发管与油管喷入的燃油进行混合,并对燃油进行蒸发;另外一部分由于气流(约占冷却腔内总进气的 50%)滞止产生的压力作用通过冷却孔进入到凹腔组织参与燃烧,其余气体通过掺混孔进入主流与高温燃气进行掺混后排出。

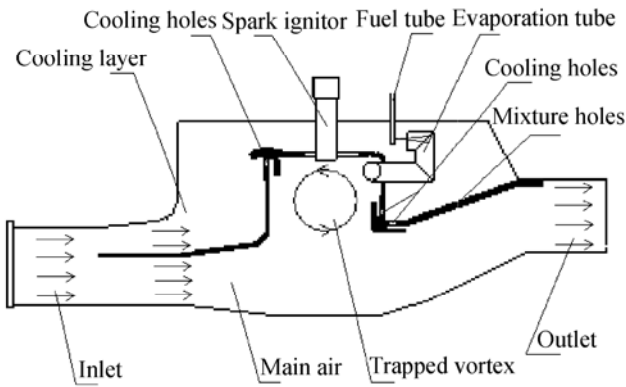


Fig 1 Schematics of single trapped vortex combustor

图 2是单驻涡燃烧室试验件蒸发管头部的示意图。整个蒸发管头部采用 T型结构,其中蒸发管两侧各有 $\Phi 4\text{ mm}$ 的喷孔,蒸发管朝向凹腔方向的端面开有两个 $\Phi 3\text{ mm}$ 的喷孔。其中两侧的喷孔起到连焰作用,中间的两个喷孔是调节出口温度场作用。

2.2 点火试验工况及方案

本次点火试验是采用高能电嘴直接点火方式,通过改变电嘴位置,深度和能量,在不同主流工况下进行点火试验,记录点火成功的最小油量,并在点火过程记录从开始供油到点火成功的时间和从点火成功后到出口温度分布均匀的时间。表 1是点火试验的

工况状态。

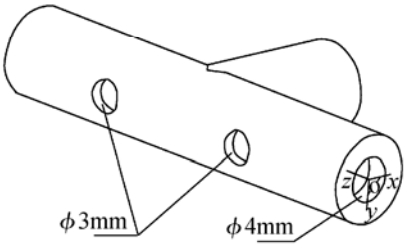


Fig 2 Schematics of evaporation tube head

Table 1 Situation of ignition experiments

Mach number of the inlet	Q 3	Q 4	Q 3	Q 4	Q 5	Q 55
Temperature of the inlet/K	623	623	723	723	623	623

图 3是单驻涡燃烧室点火试验电嘴位置变化示意图。图 3(a)中点火电嘴位置 1(P1)表示:电嘴中心线轴向距离凹腔后体内壁面 22.5 mm,周向距离中心蒸发管(三个蒸发管中间的那个)中轴线 55 mm;位置 2(P2)表示:电嘴中心线轴向距离凹腔后体内壁面 17.5 mm,周向距离中心蒸发管中轴线 50 mm。

图 3(b)中点火电嘴深入到凹腔深度 1:电嘴头部伸出凹腔顶部盖板 2 mm;深度 2 电嘴头部伸出凹腔顶部盖板 7 mm;点火试验采用的电嘴能量分为: 2J-3~ 5 H z, 4J-3~ 5 H z和 6J-3~ 5 H z。

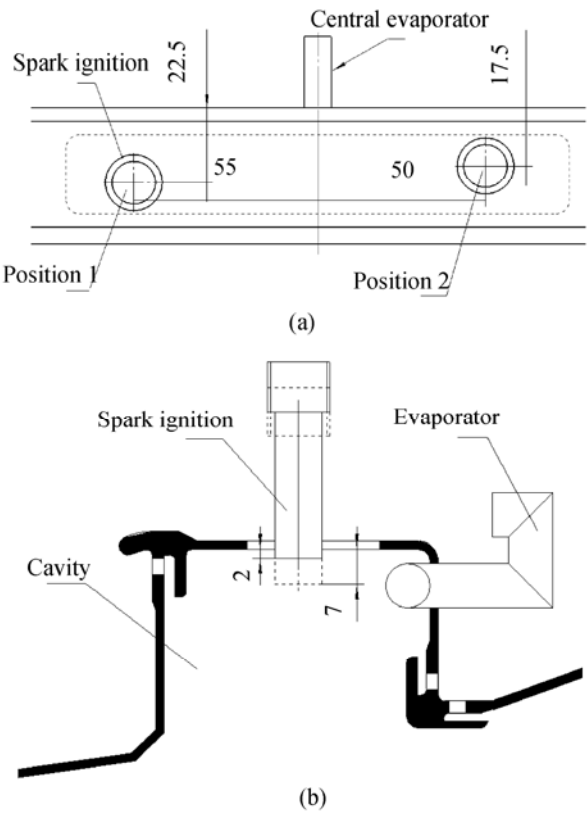


Fig 3 Position of spark igniter

2.3 试验装置及测试系统

点火试验在北航热动力研究所航空发动机气动热力重点实验室旋流燃烧试验台上进行。主流气流采用两台空气压缩机提供气源, 压缩机出来的空气经过火焰筒燃烧器直接加温, 供燃烧试验用; 从加热器出来的空气温度可以到 573~773 K。进入到试验件中的气流的流动方向见整个燃烧试验系统图 4 气流方向为从左到右。

试验测量主要包括气流参数测量和燃油流量测

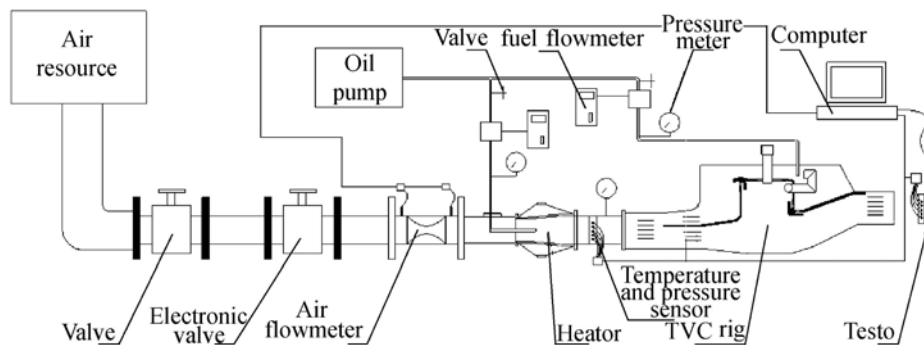


Fig 4 System sketch of trapped vortex combustor experiment

3 试验结果及分析

3.1 电嘴探入凹腔深度对点火性能的影响

图 5 和图 6 分别是主流温度 623K 时, 两个位置贫油点火极限 α 随主流马赫数, 电嘴深度及点火能量变化图。图 5 表示在位置 1 时, 不同马赫数下贫油点火极限随着点火电嘴探入深度的变化最大约为 20%。在马赫数小于 0.4 时, 不同深度对应的贫油点火极限变化探入深度 7 mm 的余气系数要略大于深度 2 mm; 而马赫数大于 0.4 时, 探入深度 7 mm 的余气系数要小于深度 2 mm。随着主流马赫数的变化, 点火电嘴处于位置 1 时, 电嘴处于不同深度贫油点火极限变化平缓。

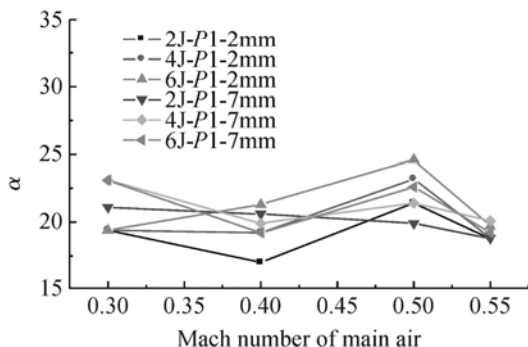


Fig 5 α varies as Ma and spark energy at P1

量两个部分。主流气流流量采用孔板流量计测量, 空气流量范围: 0~200 m³/min 最大绝对压力 0.8 MPa。进口气流参数测量包括 8 个测量座, 每个测量座可以安装一个 5 个温度测点的总温测量耙或者 5 点总压的测量探针, 完成燃烧室进口气流的温度和总压测量, 同时进口布置精密压力表, 测量进口气流的静压。出口测量拟采用位移机构结合 5 支测量耙, 其中包括三支温度测量耙和两支压力测量耙。火焰筒和凹腔供油均采用质量流量计进行测量。

0.5 时, 点火电嘴探入深度和电嘴能量的变化对贫油点火极限的影响变化最大约为 23%; 在主流马赫数为 0.55 时, 电嘴能量为 4J 时, 探入深度对贫油点火极限的影响最大可达到 33%。

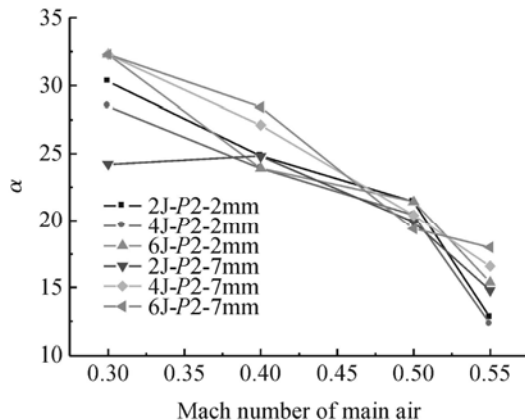


Fig 6 α varies as Ma and spark energy at P2

点火位置和点火深度的改变对点火性能的影响, 直接反映的是点火区域油气比的变化, 而整个燃烧室采用的进气一体式设计, 使得主流进气于蒸发管进气联系紧密。在马赫数大于 0.4 时, 气流速度较大同时由蒸发管喷出的气流速度增加, 气流携带燃油气液混合物喷出, 通过燃烧室的观察窗观察到, 油气混合更贴近凹腔上壁面, 所以探入深度为 2 mm 时点火更加容易; 在马赫数小于 0.4 时, 气流速度降低, 油气混合物的浓度中心偏离凹腔上壁面而向凹腔内移动, 这时

图 6 表示位置 2 的变化情况, 在主流马赫数小于

电嘴探入深度为 7 mm 时更容易点火成功。

3.2 电嘴位置改变对点火性能的影响

图 7 是固定电嘴探入深度 2 mm, 贫油点火极限随主流马赫数及电嘴位置变化图。从图中可以看出, 在主流马赫数小于 0.45 时, 位置 2 比位置 1 点火更加容易; 在主流马赫数大于 0.45 时, 位置 1 比位置 2 点火更加容易。整个点火试验中, 位置 1 贫油点火极限变化比较平缓, 而位置 2 的贫油点火极限变化相对剧烈。

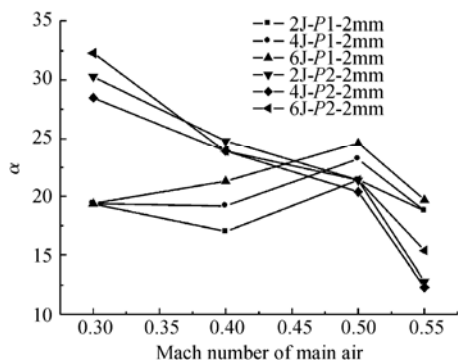


Fig 7 α varies as Ma and spark energy at two positions

对比两个位置可以看出, 位置 1 点火电嘴处于两个蒸发管中心, 无论主流气流以及蒸发管内的气流如何变化, 从两个蒸发管喷出的油气混合物都相对均匀一致, 所以余气系数的变化是因为主流气流流量的增大造成。同时位置 2 相对于位置 1 无论在周向方向和轴向方向均靠近中心的蒸发管, 这时两个相邻的蒸发管喷出的油气混合物对这个区域的影响不同。当气流速度小时, 点火电嘴处于的区域为中心蒸发管喷出油雾粒径分布恰当的区域 (由雾化试验得到最佳的点火粒径分布区域位于蒸发管喷口下游某位置, 该位置与喷口喷出的油气混合物速度有关^[7]), 所以较大的余气系数就可以使得点火成功; 当气流速度增大后, 从蒸发管内喷出的油气混合物速度也增大了, 使得油雾粒径分布恰当的区域沿着气流喷射方向移动, 这时需要增大油量即减小余气系数使得位置 2 的区域油雾粒径分布恰当才会点火成功。

3.3 电嘴能量改变对点火性能的影响

图 8 和图 9 分别是固定位置和电嘴探入深度, 贫油点火极限随主流马赫数及点火能量变化图。

图 8 是电嘴位置 1 伸入凹腔 2 mm 时, 贫油点火极限随主流马赫数及点火能量变化图。随着主流马赫数的增大, 贫油点火极限略有增大然后减小, 点火能量对贫油点火极限的影响最大可到 20%。如上所述, 位置 1 区域油气混合物都相对均匀一致, 所以点

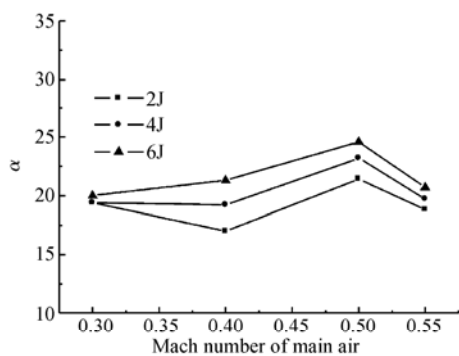


Fig 8 α varies as Ma and spark energy at P1

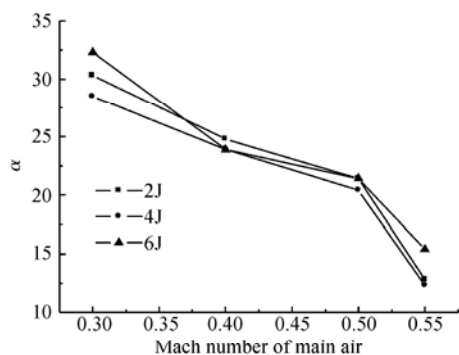


Fig 9 α varies as Ma and spark energy at P2

火能量的增大有利于点火成功。

图 9 是电嘴位置 2 伸入凹腔 2 mm 时, 贫油点火极限随主流马赫数及点火能量变化图。在主流马赫数小于 0.5 时, 点火能量对贫油点火极限的影响很小, 马赫数相同时余气系数变化最大为 12%。而主流马赫数大于 0.5 后, 点火能量对贫油点火极限的影响变得剧烈, 最大余气系数变化约为 24%。在位置 2 区域, 中心蒸发管喷出的油气混合物对点火性能影响较大。在气流速度大到一定值 (0.55) 时, 雾粒径分布恰当的区域已经脱离了原来气流速度较小的区域, 这样能量大的电嘴影响的范围更大, 而小能量的电嘴只有通过减小余气系数来获得最佳点火的粒径分布, 所以点火变得困难。

3.4 主流温度改变对点火性能的影响

图 10 是主流马赫数为 0.4 时, 贫油点火极限随主流温度及点火能量变化图。主流温度升高后, 整个蒸发管内的气体温度也随着升高, 对燃油的雾化起到有利的作用, 在雾化性能变好后点火更加容易。图中表示两个位置温度较高时, 贫油点火极限都有所增大, 最大可以达到 20%。

4 结 论

对采用蒸发管供油的进气一体式矩形单驻涡燃

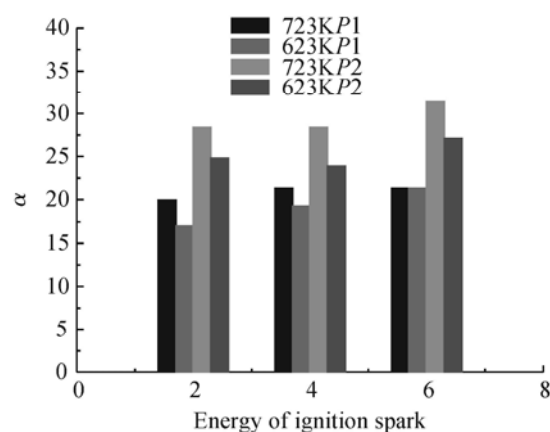


Fig 10 α varies as temperature and spark energy

烧室的点火试验结果表明:

(1)在主流温度 623~723 K, 马赫数 0.3~0.55 条件下都可以点火成功;

(2)位置 1 贫油点火极限随主流马赫数变化比较平缓, 位置 2 贫油点火极限随主流马赫数变化相对位置 1 剧烈;

(3)点火电嘴探入凹腔深度变化在若干工况对点火性能有一定影响。综合考虑燃烧室应用和电嘴寿命, 在以后的试验中电嘴探入深度为 2 mm;

(4)电嘴处于位置 1 时点火能量改变对贫油点火极限的影响得更为明显;

(5)主流温度升高有利于燃油在蒸发管内蒸发, 点火性能变好。

(6)由于蒸发管的进气量与主流马赫数相关, 准确测量蒸发管内的气量有很大的困难, 计划在后面的

工作中借助数值模拟方法对蒸发管内的流动情况作进一步的工作。

致谢: 感谢刘志强同学和杨李同学对试验的大力帮助, 感谢赵汉中老师, 侯木玉老师, 孟航生老师和马开亮师傅对试验的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Roquemore W M, Dale Shouse, Dave Burnus et al Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines[R]. AIAA 2001-0483
- [2] 胡正义. 航空发动机设计手册 (第九册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [3] 侯晓春, 季鹤鸣, 刘庆国, 等. 高性能航空燃气轮机燃烧技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [4] 张弛. 切向驻涡燃烧室基础研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007
- [5] 易其. 驻涡燃烧室流动和燃烧特性研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006
- [6] 孔昭健. 驻涡燃烧室燃烧特性及结构优化研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007
- [7] 樊未军, 孔昭健, 李继宝, 等. 新型蒸发燃油喷射装置的雾化和蒸发性能 [J]. 推进技术, 2007, 28(3): 244 ~ 247. (FAN Wei-jun, KONG Zhao-jian, LI Ji-bao et al Performance of pulverization and evaporation of new type evaporating fuel inject equipment [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(3).)

(编辑: 梅 瑛)