

文章编号: 1000-8055(2008)12-2280-06

主流及掺混气温度对单涡/贫油驻涡 燃烧室点火及熄火性能影响的试验

邢 菲, 张荣春, 樊未军, 柳 杨, 闫永强
(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: 针对一种以煤油为燃料的单驻涡燃烧室, 在前期研究的基础上针对驻涡燃烧室可应用于级间燃烧的情况进行了研究. 试验中对仅采用凹腔供油的单驻涡燃烧室的点火及贫油熄火进行了研究. 结果表明, 掺混进气温度增加可以最大降低点火油气比 20 % 左右, 拓宽贫熄边界 30 % 左右; 对于这种结构和进气条件的燃烧室, 主流气量则存在一个最佳值, 使得点火总油气比最小. 进口流速达到马赫数 0.59 时点火开始变得困难.

关 键 词: 单涡驻涡燃烧室; 点火; 贫油熄火
中图分类号: V235.11 **文献标识码:** A

Experiment study on single/fuel-lean trapped vortex combustor ignition and limit blow-out at different main air and mix air temperatures

XING Fei, ZHANG Rong-chun, FAN Wei-jun, LIU Yang, YAN Yong-qiang
(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To investigate ignition and limit blow-out (LBO) of a single trapped vortex combustor (cavity fueled only) test rig with kerosene as fuel, experiments were conducted in various inlet main air conditions and temperatures of premixed air. The experiment results indicate that the temperature of premixed air would improve ignition and LBO obviously, but the cavity air is a key factor. There is a critical value for main air, and the single trapped vortex combustor could obtain the best ignition performance. It becomes difficult for ignition when Mach number of main air is 0.59.

Key words: single trapped vortex combustor; ignition; limit blow-out (LBO)

现代航空发动机的发展对设计提出了更高的要求, 其中一个重要问题是拓宽燃烧稳定工作范围^[1]. 军用航空发动机慢车工况的贫油熄火油气比如果能小于或等于 0.005 的设计指标, 那么在高空一般就能稳定燃烧, 在机动飞行时不易熄

火^[2]. 为适应高性能燃气轮机燃烧室性能的需要, 1988 年美国提出的 IHPTET 计划中公布了研究中的驻涡燃烧室, 即 TVC (Trapped vortex combustor) 方案^[3-5]. 驻涡燃烧室是一种简单、紧凑的燃烧室, 在低费用、低排放方面具有巨大的潜力,

收稿日期: 2007-11-21; 修订日期: 2008-02-28

基金项目: 航空科学基金(2006ZB51021)

作者简介: 邢菲(1980-), 男, 辽宁锦州人, 博士生, 主要从事驻涡燃烧室的设计及性能研究.

与过去 40 年来所被普遍采用的漩流器燃烧室相比,驻涡燃烧室采用了一种不同的方式.燃烧室分为两个部分,驻涡区和主燃烧区,驻涡区用来稳定火焰,主燃区用来提供动力.驻涡区使用凹腔建立稳定的回流区.采用合理的凹腔尺寸设计,使得在一个比较宽范围的主流进气状况下都能建立稳定的回流区,同时还可以得到相对低的燃烧室压力损失.虽然驻涡区与主流相连,仍然可以在主进气速度比较高的情况下能获得稳定的火焰.

驻涡燃烧室的研究到目前为止已经发展到第四代^[6],但是绝大部分国内外研究都侧重于双涡驻涡燃烧室的研究,从双涡结构的流场^[7],燃烧诊断^[8],污染排放^[9]等方面对其进行了深入细致的研究.但是对于单涡驻涡燃烧室相关文献和研究成果都很少,本文介绍了带冷却单涡驻涡燃烧室的性能的试验研究.

与传统的燃烧室头部相比,TVC 的燃烧室结构简单和重量轻,并且没有漩流组件.由于驻涡燃烧室自身这些特点所以其可应用于级间燃烧即位于第一级涡轮之后和第二级涡轮之前,构成二级燃烧室,可以提高发动机的推力.由于燃烧所用空气来源于涡轮之后,来流马赫数很高,空气中氧气含量较低,造成了实际的点火困难和易熄火.在这种背景下模拟这种工况中的马赫数,试验中来流马赫数最大达到 0.59,对单涡驻涡燃烧室的点火和贫油熄火特性进行了深入的研究,取得了满意的结果.

1 试验系统

1.1 试验件

液态燃料驻涡燃烧室如图 1 所示,试验件分为主流通道、凹腔两个部分组成.凹腔内空气由主流、掺混气及凹腔进气三部成,燃油与掺混气混合后从 C 处一起供入凹腔.凹腔路供给的燃油和凹腔内的空气在由环状凹腔形成的预燃区内有效混合并燃烧形成稳定的火焰区.在凹腔底部壁面安装点火嘴座和观察窗,用来点火和观察凹腔内的燃烧状态.凹腔进气由 B 和 D 处供入,这种进气方式有利于在凹腔中形成稳定的涡,并同时可以对凹腔壁面进行冷却.

驻涡区供油方式采用蒸发直管,安装位置位于 C 处,燃油从总管引出后首先在燃烧室外与加热气体进行混合达到初步雾化的目的然后由蒸发管喷入凹腔,其中加热气体是通过电加温器.燃油与加热空气的预先混合可以增加两者掺混的时

间,达到更好的蒸发效果和油气混合.

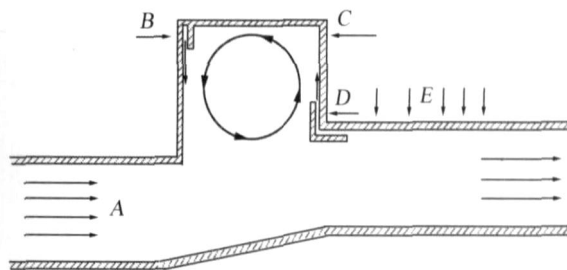


图 1 驻涡燃烧室试验件结构简图

Fig. 1 Schematics of trapped vortex combustor

1.2 试验装置及测试系统

驻涡燃烧室燃烧试验系统如图 2 所示.试验使用的燃料为航空煤油,燃料 f 通过辅路供使用科里奥利质量流量计计量流量.气体分三路进入燃烧室,分别为主流、凹腔前体进气和凹腔后体进气.主流进气量使用电动阀调节,采用孔板流量计计量主流气量.凹腔前后体进气量使用手动球阀调节,分别采用浮子流量计测量流量.凹腔后体进气通过电加热器加热后进入燃烧室.喷入凹腔的燃油通过安放在凹腔底部的点火电嘴点燃,点火电嘴的点火频率为 2~3 Hz,能量为 6J.利用接在燃烧室出口的 Testo360 烟气分析仪结合位移机构测量燃烧室出口温度及烟气成分.

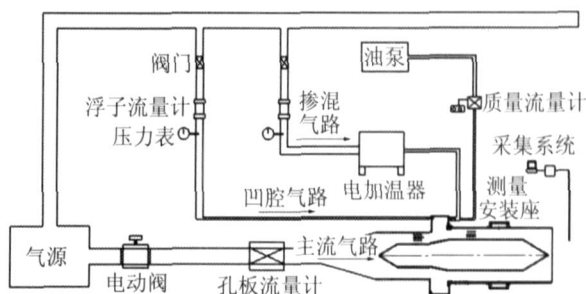


图 2 驻涡燃烧室试验系统图

Fig. 2 System of TVC combustor test device

1.3 试验方法

在实验中,只研究驻涡区的点火及贫油熄火性能,主要考虑的影响因素为燃烧室主流供气量、燃油掺混气温度、凹腔进气量.主流气量 m_{main} 选 4 个状态分别为:687,867,1164,1341 g/s,实验中燃油掺混气量保持不变为 80 g/s 左右且全部供入凹腔,凹腔总气量 m_{cavity} 为 85,101,117,138 g/s 之间变化,燃油掺混气温度 T 分别为 293,423,573 K,加热温度由加热器控制.表 1 为不同主流量对应的主流进气马赫数.

表 1 主流进气马赫数
Table 1 Mach number of main air

主流方案	流量 $m_{\text{main}}/(\text{g/s})$	马赫数 M_{main}
主流 1	687	0.30
主流 2	867	0.40
主流 3	1164	0.55
主流 4	1341	0.59

2 试验结果及分析

2.1 点火性能

点火实验时凹腔油路供油,直至燃烧室点燃并完成联焰,此时记录下油路质量流量计的示数,即为点火油量 m_{fuel} . 点火油气比分为点火凹腔油气比 $f_{\text{cavity}} = m_{\text{fuel}}/m_{\text{cavity}}$ 和点火总油气比 $f_{\text{total}} = m_{\text{fuel}}/(m_{\text{main}} + m_{\text{cavity}})$.

2.1.1 燃油掺混气温度的影响

不同燃油掺混气温度的下单涡-驻涡燃烧室点火凹腔油气比随凹腔进气量的变化曲线如图 3 和图 4 所示,图 3 和图 4 所对应的主流气流分别为 867 g/s 和 1164 g/s.

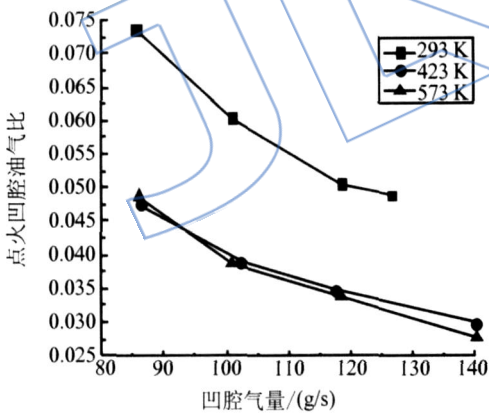


图 3 $m_{\text{main}} = 867 \text{ g/s}$ 下不同 T 下 f_{cavity} 随 m_{cavity} 的变化
Fig. 3 f_{cavity} versus m_{cavity} when $m_{\text{main}} = 867 \text{ g/s}$

从图 3 和图 4 中可以看出:点火凹腔油气比随凹腔气量的增加逐渐减小,其变化范围为分别为 0.074~0.028 和 0.094~0.049. 燃油掺混气温度对于凹腔点火油气比的影响是很明显的,但是在不同主流气量条件下其规律是不同的. 从图 3 和图 4 的对比中可以看出:当主流气量较小时如图 3 所示,掺混气在 423 K 和 573 K 两种条件下对点火油气比的影响区别并不明显,而当主流气量逐渐增大,如图 4 主流气量为 1164 g/s 的情况其

区别是明显的.造成这一区别的原因可能在于:当主流气量为 867 g/s 时,423 K 和 573 K 两种温度的掺混气对于凹腔内的总气量对点火所产生的效果大致相同.当主流气量增大到 1164 g/s 时,423 K 和 573 K 的加热效果对于较大的凹腔内气量所产生的效果产生了差别,所以对于点火凹腔油气比影响的区别变得比较明显了.

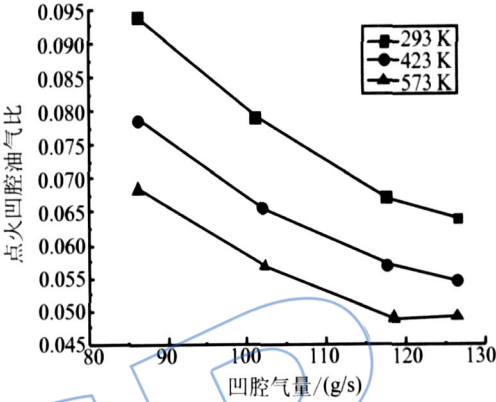


图 4 $m_{\text{main}} = 1164 \text{ g/s}$ 下不同 T 下 f_{cavity} 随 m_{cavity} 的变化
Fig. 4 f_{cavity} versus m_{cavity} when $m_{\text{main}} = 1164 \text{ g/s}$

图 5 和图 6 分别为主流气量为 867 g/s 和 1164 g/s 条件下,点火总油气比随凹腔气量的变化图.点火总油气比随凹腔气量的增加逐渐减小,其变化范围分别为:0.00656~0.00355 和 0.00643~0.00451. 主流油气比的变化范围不大,这是因为相对于主流气量,凹腔气量很小,所以总油气比对凹腔气量的变化不明显. 掺混气温度的提高会更利于点火,这主要是由于驻涡区供油采用的是燃油预蒸发方式,掺混气体温度升高会有利于燃油的雾化蒸发,再由蒸发管喷射入凹腔,在凹腔内形成合适的油气分布,因此更利于点燃.

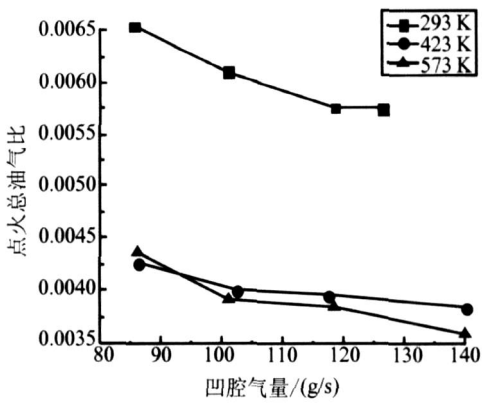


图 5 $m_{\text{main}} = 867 \text{ g/s}$ 下不同 T 下 f_{total} 随 m_{cavity} 的变化
Fig. 5 f_{total} versus m_{cavity} when $m_{\text{main}} = 867 \text{ g/s}$

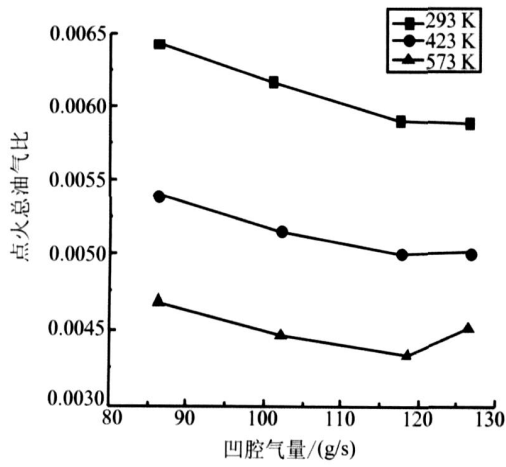


图 6 $m_{\text{main}} = 1164 \text{ g/s}$ 下不同 T 下 f_{total} 随 m_{cavity} 的变化
Fig. 6 f_{total} versus m_{cavity} when $m_{\text{main}} = 1164 \text{ g/s}$

2.1.2 主流气量的影响

图 7 为不同主流流量时点火凹腔油气比随凹腔气量的变化曲线. 从图中可以看出:主流气量的变化对凹腔点火油气比的影响是不同的,在主流气量较小时对于凹腔点火油气比几乎没有影响,这也验证了驻涡区和主流区被凹腔分隔开,凹腔内的燃烧可以不受主流的影响,形成稳定的燃烧区.但是当主流流量增大,主流气卷吸进入凹腔内的气量增大,凹腔点火油气比变大.此时主流气量才会对单涡-驻涡燃烧室产生明显的影响.

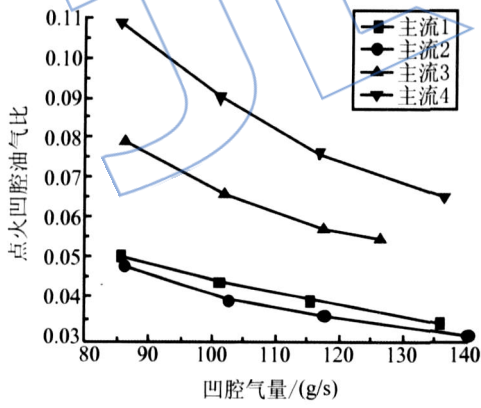


图 7 不同 m_{main} 时 f_{cavity} 随 m_{main} 的变化
Fig. 7 f_{cavity} versus m_{cavity} at different m_{main}

图 8 为不同主流流量时总油气比随凹腔气量的变化曲线. 从图中可以看出点火总油气比整体上还是随着凹腔气量的增大而逐渐减小. 总点火油气比受主流气量的影响很明显,主气量增大总点火油气比减小,但是在主流马赫数 0.45 时,点火总油气比最小. 这种情况说明,对于这种特定结构的单驻涡燃烧室,可能存在一个最佳的主流值使得总点火油气比最小. 同时,可以推测对于其他结构的驻涡燃烧室都会存在这样一个最佳主流

进口条件,可以达到最小的点火油气比.

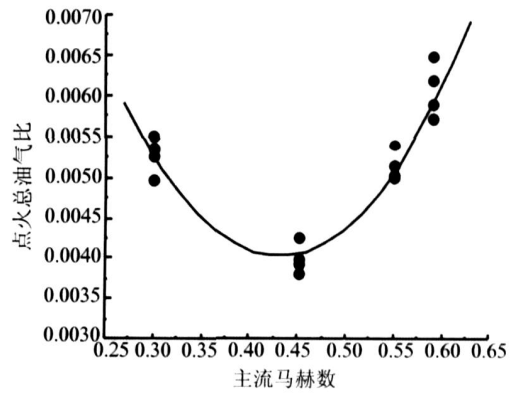


图 8 不同 m_{main} 时 f_{total} 随 m_{main} 的变化
Fig. 8 f_{cavity} versus different m_{main}

2.1.3 点火性能小结

通过对单涡-驻涡燃烧室进行点火实验,通过分析可以对单涡-驻涡燃烧室点火性能得到以下几点结论:

- 1) 随着凹腔气量的增加,点火凹腔油气比和点火总油气比都随之减小;
- 2) 掺混气温度增加有利于凹腔点火,最高可以降低点火油气比 20 % 左右;
- 3) 主流气量存在一个最佳值,针对这种燃烧室结构,在不同的凹腔进气条件下,存在主流与凹腔相互配合的最佳值,使得总的点火油气比最小;
- 4) 常温下当主流气量大于 1341 g/s 时,点火总油气比达到 0.01 时还不能点燃,点火变得困难.

2.2 贫油熄火性能

试验中同时对单涡-驻涡燃烧室的贫油熄火特性进行了研究. 实验方法是在熄火实验过程中,凹腔一路供油,逐渐减小供油量,直到驻涡燃烧室熄灭,记录此时凹腔供油量,即为熄火油量 m_{fuel} . 燃烧室熄火油气比分别定义为熄火凹腔油气比和熄火总油气比,定义为

$$f_{\text{cavity}}'' = \frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{cavity}}} \quad \text{和} \quad f_{\text{total}}'' = \frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{main}} + m_{\text{cavity}}}$$

2.2.1 燃油掺混气温度的影响

图 9 和图 10 分别为主流气量 1164 g/s 和 1314 g/s 下不同掺混气温度下贫熄凹腔油气比随凹腔气量的变化,从图中可以看出凹腔熄火油气比随凹腔气量的增加而减小,掺混气温度升高凹腔熄火油气比降低,其变化范围为分别为 0.0175~0.00856 和 0.023 2~0.0134,提高掺混气温度可以拓宽贫熄边界 30 % 左右,这主要是由于驻涡区供油采用的是蒸发管雾化方式,来流温度升高会

有利于燃油的雾化蒸发。

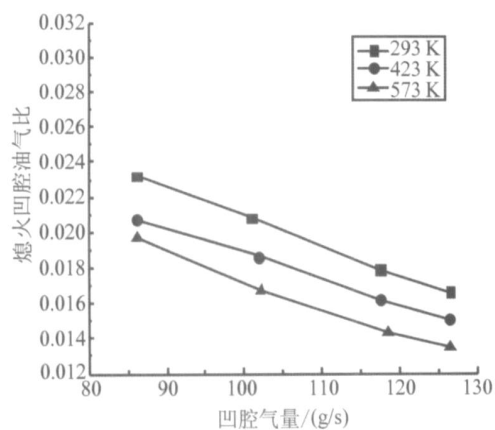


图 9 $m_{\text{main}} = 1164 \text{ g/s}$ 下不同 T 下随 m_{cavity} 的变化
Fig. 9 f''_{cavity} versus m_{cavity} when $m_{\text{main}} = 1164 \text{ g/s}$

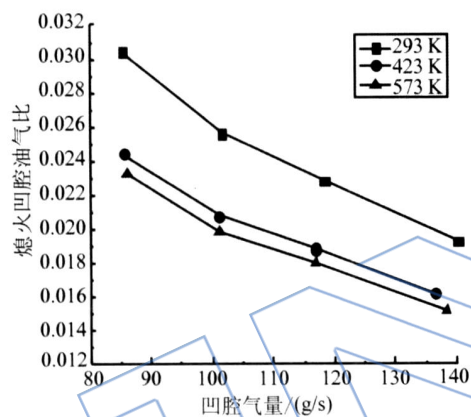


图 10 $m_{\text{main}} = 1314 \text{ g/s}$ 下不同 T 下随 m_{cavity} 的变化
Fig. 10 m_{main} versus m_{cavity} when $m_{\text{main}} = 1314 \text{ g/s}$

对比图 9 和图 10 可以发现不同掺混气温度下所示的规律是大致相同的,而掺混气温度对凹腔熄火的影响没有凹腔气量对其产生的影响显著。

图 11 和图 12 分别为主流气量 1164 g/s 和 1314 g/s 下不同掺混气温度下贫熄总油气比随凹

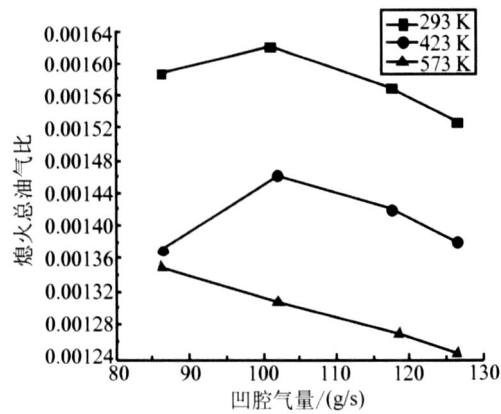


图 11 $m_{\text{main}} = 1164 \text{ g/s}$ 下不同 T 下随 m_{cavity} 的变化
Fig. 11 f''_{total} versus m_{cavity} when $m_{\text{main}} = 1164 \text{ g/s}$

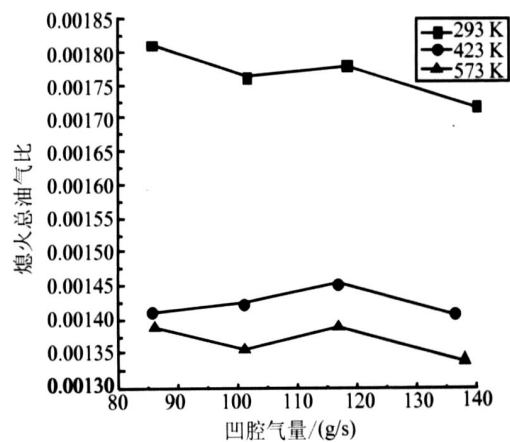


图 12 $m_{\text{main}} = 1314 \text{ g/s}$ 下不同 T 下随 m_{cavity} 的变化
Fig. 12 f''_{total} versus m_{cavity} when $m_{\text{main}} = 1314 \text{ g/s}$

腔气量的变化,三种掺混气温度下,贫油熄火总油气比最小值能达到 0.001 05 和 0.001 24 左右,温度提高可以拓宽燃烧室熄火边界。

2.2.2 主流气量的影响

图 13 为不同主流流量时贫熄凹腔油气比随凹腔气量的变化。随着主流气量增大,熄火凹腔油气比增大。当主流气量较小时,凹腔内的火焰稳定,熄火油气比随凹腔气量变化也不是很显著;当气量较大时,凹腔内火焰的稳定性会受到主流的影响,随主流气量的增加,稳定性变差。

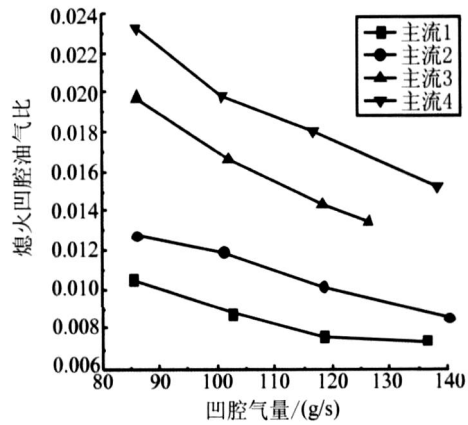
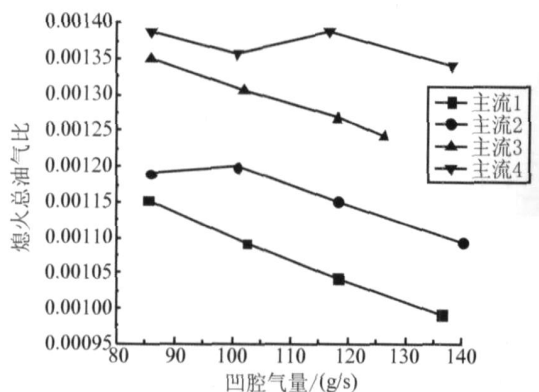


图 13 不同 m_{main} 时随 m_{cavity} 的变化
Fig. 13 f''_{cavity} versus m_{cavity} at different m_{main}

图 14 为不同主流时贫熄总油气比随凹腔气量的变化。总油气比随着主流气量的减小而减小。这主要是由于总油气比计算是将驻涡燃烧室三路气量都计算在内,而主流的气量又比另外两路大的多,所以总油气比受主流气量的影响较大。主流 4 的熄火油量出现不规则的变化,这可能是因为主流气量的增大对凹腔内的稳定性产生了影响。

图 14 不同 m_{main} 时随 m_{cavity} 的变化Fig. 14 m_{main} versus m_{cavity} at different m_{main}

2.2.3 贫油熄火性能小结

对单涡-驻涡燃烧室贫油熄火实验进行了研究,通过分析可以对驻涡燃烧室贫油熄火特性得到以下几点结论:

1) 在相同的主流时,影响熄火边界的主要因素是凹腔气量,温度升高以利于拓宽燃烧边界,最大可以拓宽 30 %左右;

2) 主流速度小于马赫数 0.45 时,凹腔贫熄火油比几乎不受主流的影响,当超过 0.5 时,凹腔火焰稳定性随主流的增加而变差,贫熄火总油比随主流气量的增大而减小。

3 结 论

在仅凹腔供油的条件下,对驻涡燃烧室点火性能、贫油熄火特性情况进行了研究,通过结果分析可以得到以下几点结论:

1) 相同主流的条件下,点火油比变化的主要影响因素是凹腔气量;掺混进气温度增加有利于凹腔点火;存在最佳主流气量使得点火总油气

比最小。

2) 在相同的主流时,掺混气温度升高以利于拓宽燃烧边界;主流速度大于马赫数 0.5 时,凹腔火焰稳定性随主流的增加而变差。

驻涡燃烧室的结构特点使它可以获得较宽的工作范围。本次试验只是模拟了实际条件中的马赫数,关于温度、压力等参数的模拟试验将继续开展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Bahr D W. Technology for the design of high temperature rise combustors[R]. AIAA-85-1292.
- [3] Hsu K Y, Goss L P, Trump D. Performance of a trapped-vortex combustor[R]. AIAA95-0810.
- [4] Hsu K Y, Goss L P. Characteristics of a trapped-vortex combustor [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1):57-65.
- [5] Burrus D L, Johnson A W, Roquemore W M, et al. Performance assessment of prototype trapped vortex combustor concept for gas turbine application[R]. ASME 2001-GT-0087.
- [6] Roquemore W M, Shouse D, Dave B, et al. Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines[R]. AIAA 2001-0483.
- [7] 樊未军,易琪,严明,等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(9):66-70.
FAN Weijun, YI Qi, YAN Ming, et al. A study of double vortex structure in the trapped vortex combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(9):66-70. (in Chinese)
- [8] Meyer T R, Brown M S, Fonov S, et al. Optical diagnostics and numerical characterization of a trapped-vortex combustor [R]. AIAA 2002-3863.
- [9] Hendricks R C, Shouse D T, Roquemore W M. Water injected turbomachinery[R]. NASA/ TM-2005-212632.