

文章编号: 1000-8055(2008)05-0871-06

油气匹配及后体进气量对 TVC 燃烧性能的影响

邢 菲, 樊未军, 柳 杨, 孔昭健, 刘玉英, 杨茂林

(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 100083)

摘 要: 针对一种以煤油为燃料的驻涡燃烧室 (TVC), 在前期研究的基础上对其前体油气匹配进行几种结构改进, 并在试验中重点进行油气匹配和后体进气量的改变对燃烧室燃烧性能的影响. 针对其应用于涡轮前及涡轮间二级燃烧的前景, 试验中驻涡燃烧室仅采用凹腔供油. 试验结果表明, 采用改进后供油蒸发管的燃烧效率比改进前提高了 12%; 在试验条件下, 当凹腔当量比小于 1.5 时燃烧效率达到 95% 以上. 各个方案在不同工况下, 出口热点温度分布系数 f 在 0.05~0.015 之间.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 驻涡燃烧室; 油气匹配; 燃烧效率

中图分类号: V235. 11

文献标识码: A

Effect of different fuel-air matching forms on combustion performance of trapped vortex combustor

XING Fei, FAN Wei-jun, LIU Yang, KONG Zhao-jian, LIU Yu-ying, YANG Mao-lin

(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the combustion efficiency and temperature distribution performance of a trapped vortex combustor (TVC) test rig, many experiments were conducted for structural improvement of fuel-air matching under various inlet conditions. Concavity oil supply was applied to TVC during the experiment in view of the secondary combustion in front of and between turbines. The results of the experiment indicate that, the combustion efficiency could increase by 12%; when the concavity equivalence ratio is less than 1.5, the combustion efficiency will reach over 95%; Pattern factor (f) of all the cases is between 0.05 and 0.015 in various working conditions.

Key words: aerospace propulsion system; TVC; fuel-air matching; combustion efficiency

燃烧室是发动机的一个重要组成部分, 好的燃烧室应具有点火性能好, 温度分布均匀, 流阻损失小, 排气污染少和结构紧凑等基本特征. 随着技术的发展, 为适应高性能燃气轮机燃烧室的性能需要, 头部和燃料喷嘴的设计变得越来越复杂. 1988 年美国提出的 IHPTET 计划中公布了研究中的驻涡燃烧室 (Trapped vortex combustor) 方

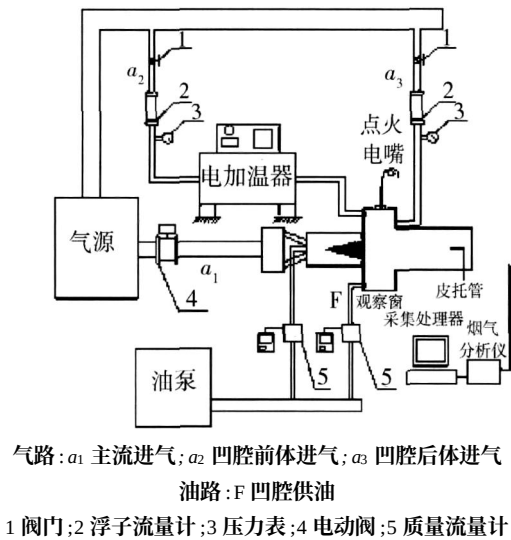
案^[1-3]. 驻涡燃烧室是一种简单、紧凑的燃烧室, 在低费用、低排放方面具有巨大的潜力, 与过去 40 年来所被普遍采用的旋流器燃烧室相比, 驻涡燃烧室采用了一种不同的方式. 燃烧室分为两个部分, 驻涡区和主燃烧区, 驻涡区用来稳定火焰, 主燃区用来提供动力. 驻涡区使用凹腔建立稳定的回流区. 采用合理的凹腔尺寸设计, 使得在一个比

收稿日期: 2007-05-11; 修订日期: 2007-11-16

基金项目: 航空科学基金资助项目 (2006ZB51021)

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

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.凹腔前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 6 J.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.



气路: a₁ 主流进气; a₂ 凹腔前体进气; a₃ 凹腔后体进气
油路: F 凹腔供油

1 阀门; 2 浮子流量计; 3 压力表; 4 电动阀; 5 质量流量计
图 3 驻涡燃烧室试验系统图

Fig. 3 System of TVC combustor test device

2 试验结果及分析

2.1 试验采集及处理方法

本文所采用的测量方法是由 testo 采集燃烧室出口截面的温度、CO、CO₂、CH₄、H₂ 和 UHC 的量,采用面积平均后代入到公式进行计算获得燃烧效率及温度分布系数.为了减小误差以上测量均采用了 5 点测量,如图 4 所示.

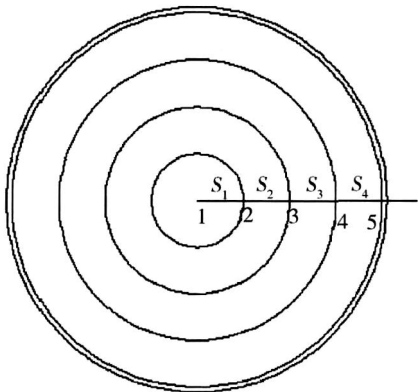


图 4 驻涡燃烧室出口测量方法示意图

Fig. 4 Measurement method of TVC

图中 s 代表对应环形的面积,面积平均采用

如下公式,其中 T_a 是代表 1 点和 2 点各种测量值的平均值,依次类推获得 T_b, T_c 和 T_d.代入到下面公式得到面积平均

$$T = \frac{T_a \times S_1 + T_b \times S_2 + T_c \times S_3 + T_d \times S_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}$$

2.2 驻涡燃烧室燃烧效率

2.2.1 各个方案燃烧效率的比较

本文所述的燃烧效率是采用烟气分析法进行计算,公式如下:

$$\eta = \frac{CO_2 + 0.531CO - 0.319CH_4 - 0.397H_2}{CO_2 + CO + UHC}$$

首先对供油系统改造前后的燃烧效率进行了对比试验.在主流气量 145 g/s,凹腔前体加热器温度为 573 K,凹腔进气量为 80 g/s 的条件下,改造前后燃烧效率随总当量比的变化,如图 5.从图中我们可以看出,由于供油系统的改进,使得整个燃烧室的燃烧效率有明显的提高,最大可提高 12%.这是由于汽化器的加长,使得高温气体对燃油的蒸发作用及撞击作用增强,燃油在进入凹腔前已经汽化得比较完善,所以在凹腔内的燃烧变得容易.

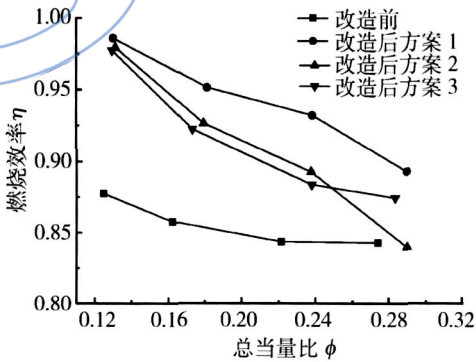


图 5 改造前后燃烧效率随总当量比变化

Fig. 5 Combustion efficiency versus total equivalence ratio

在前期对该燃烧室的研究中发现,凹腔后体进气对整个燃烧室的燃烧性能影响较大^[4].所以这一轮的试验中,重点研究凹腔后体气量的改变对燃烧效率及出口温度分布的影响.本文研究了不同方案对燃烧效率的影响.试验中保持主气路流量 a₁ 为 313 g/s 不变,对应的主流马赫数 0.33,凹腔前体加热器温度 T_{a2} 为 573 K,凹腔前体进气 a₂ 为 31.2 g/s,仅改变凹腔后体气量 a₃,分别为 15.6 g/s,31.2 g/s 和 58.6 g/s.

图 6 到图 8 为采用前体不同前体油气匹配方案时,燃烧效率随凹腔当量比 φ_{tvcavity} 的变化.三种

方案一起比较发现,在仅有凹腔供油时,三种方案表现出的趋势相同.随着后体气量的增加,燃烧效率增大,这是因为后体气量增大后使得凹腔内的油气匹配更加合理,同时后体气量是凹腔内形成双驻涡的重要条件,它的增强有利于凹腔内驻涡的稳定,对整个燃烧过程都是有益的.随着凹腔当量比(没有考虑主流对凹腔的卷吸作用)的增大,燃烧效率单调降低并趋于平缓.在凹腔当量比小于 1.5 时燃烧效率达到 95 % 以上,说明整个燃烧室更适合在贫油的条件下工作.

方案的改变对燃烧效率的影响不十分明显,三种方案相比,方案 1 略优.这是因为方案 1 是 102 个 ϕ_2 的气孔,而其他方案是 43 个 ϕ_3 的气孔.空气通过小孔分布得更加均匀,在凹腔内形成的驻涡也就越均匀稳定.

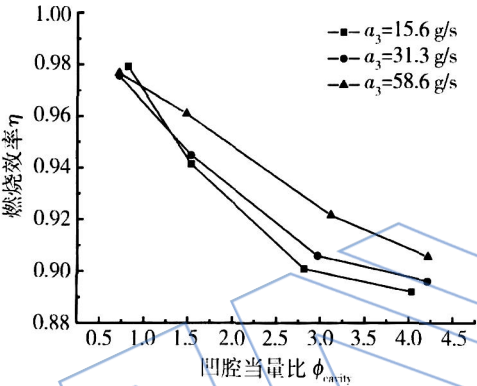


图 6 前体方案 1 燃烧效率随凹腔当量比的变化
Fig. 6 Case1 combustion efficiency versus ϕ_{cavity}

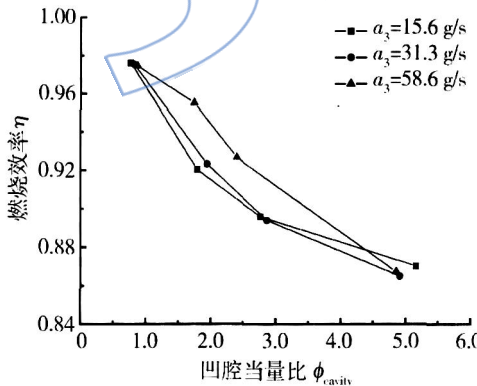


图 7 前体方案 2 燃烧效率随凹腔当量比的变化
Fig. 7 Case2 combustion efficiency versus ϕ_{cavity}

2.2.2 前体进气温度和主流流量对燃烧效率的影响

在方案 1 略优的情况下,进一步对其开展研究.图 9 为方案 1 在不同凹腔前体进气温度时燃烧效率随凹腔当量比的变化.其中主流进气量 a_1 为 313 g/s,凹腔前体进气 a_2 为 31.2 g/s,凹腔后

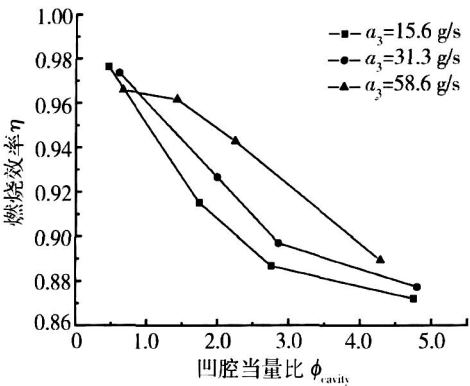


图 8 前体方案 3 燃烧效率随凹腔当量比的变化
Fig. 8 Case3 combustion efficiency versus ϕ_{cavity}

体气量 a_3 为 15.6 g/s.从图中可以看出,仅凹腔供油时的燃烧效率随凹腔当量比的增大而变小,在凹腔当量比小于 1.5 时燃烧效率达到 92 % 以上.前体进气温度对燃烧效率的影响并不明显,不同前体进气温度对应的燃烧效率都在 89 % 以上,最高可达 98 %.前体进气温度的提高,表明汽化器内与燃油掺混的气体温度提高,对燃油的蒸发有益.

图 10 为不同主流进气量对燃烧效率的影响.凹腔前体加热器温度为 573 K,凹腔前体 a_2 进气为 31.2 g/s,凹腔后体气量 a_3 为 15.6 g/s.从图中可以看出,主流气量较小时,平均燃烧效率较高.主流气量为 365 g/s(对应的主流马赫数为 0.37)到主流气量为 157 g/s(对应的主流马赫数为 0.252),随着主流气流的速度增大,燃烧效率降低.与前体温度变化规律一致的是随着凹腔当量比的增加,燃烧效率降低.

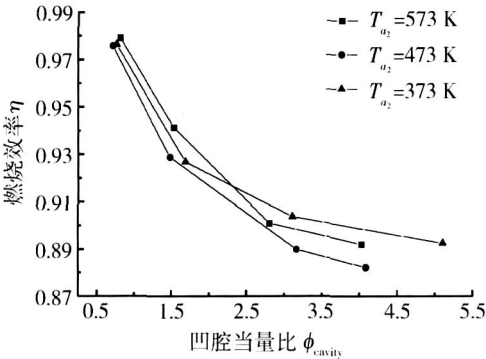


图 9 不同前体进气温度时燃烧效率随凹腔当量比的变化
Fig. 9 Case1 combustion efficiency versus ϕ_{cavity} at different T_{a2}

2.3 燃烧室出口温度分布

燃烧室出口温度分布直接影响第一级涡轮导向叶片工作和工作叶片的寿命及其可靠性,是燃

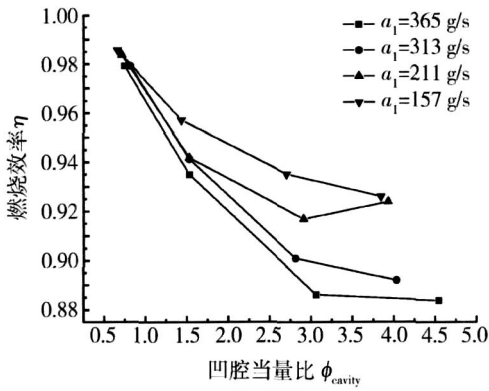


图 10 不同主流时燃烧效率随凹腔当量比的比较

Fig. 10 Case1 combustion efficiency versus ϕ_{cavity} at different a_1

烧室的重要性能指标之一. 探讨驻涡燃烧室应用于涡轮前或涡轮间的前景, 研究其出口温度分布是极其必要的. 本文讨论的出口温度分布系数 f 是采用热点温度分布系数^[5-6], 公式如下:

$$f = (T_{max} - T_{avg}) / (T_{avg} - T_{inlet})$$

其中, T_{max} 为出口最高温度, T_{avg} 为出口平均温度, T_{inlet} 为进口平均温度.

图 11 为三种方案组合温度分布系数随凹腔后体气量的变化曲线. 主流进气 a_1 为 313 g/s, 凹腔前体进气流量 a_2 为 31.2 g/s, 温度为 573 K, 凹腔后体进气量 a_3 分别为 15.6, 23.4, 31.2, 39.0, 46.9 和 58.6 g/s. 从图中可以看出, 三种方案温度分布系数 f 大致相当, 第二种方案的出口温度分布均匀性最好. 同时还可以发现, 后体气量的变化对出口温度分布没有显著的影响. 这是由于后体气流的喷入凹腔内, 与前体气流及燃油相互作用形成驻涡, 经过了和主流的掺混后排出, 而不是直接进入主流影响其温度分布.

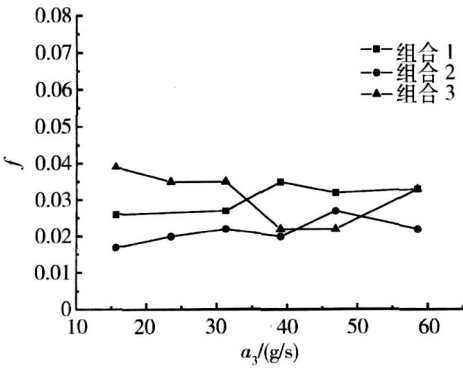


图 11 不同方案时 f 随凹腔后体气量的变化

Fig. 11 f versus after-wall inlet for cases

本文还研究仅凹腔供油时前体进气温度及主流流量对出口温度分布的影响. 其中前体油气匹

配组合采用方案 1, 主流进气 a_1 为 313 g/s, 凹腔前体进气 a_2 为 31.2 g/s, 凹腔后体进气量 a_3 分别为 15.6, 23.4, 31.2, 39.0, 46.9 和 58.6 g/s.

图 12 为不同凹腔前体进气温度时, 燃烧室出口温度分布系数 f 随凹腔后体气量变化的曲线. 前体进气加热器温度为 373 K, 473 K 和 573 K, 从图中可以看出, 凹腔前体进气温度提高对出口温度分布的影响没有明显的规律. 进气温度 473 K 和 573 K 时比 373 K 时出口温度分布更加均匀.

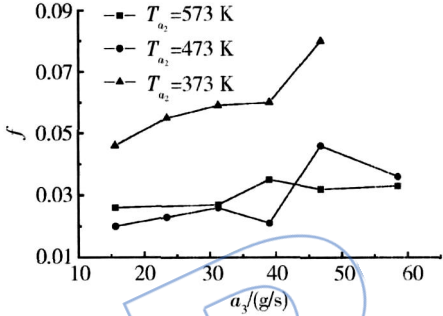


图 12 不同前体进气温度时 f 随后体气量的变化

Fig. 12 Case1 f versus a_3 at different T_{a2}

图 13 为不同主流进气量时燃烧室出口温度分布系数 f 随凹腔后体气量的变化. 主流进气分别为 365 g/s, 313 g/s 和 211 g/s, 前体进气加热器温度固定为 573 K. 可以看出主流气量减小, 有利于对燃烧不稳定所产生的局部高温进行控制. 主流气量的减小, 高温燃烧产物与主流混合变得更加容易, 同时气流流量的减小也体现在流速的降低, 同样对出口温度分布有利.

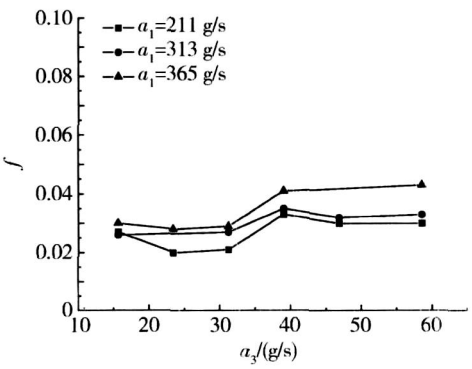


图 13 不同主流气量时 f 随后体气量的变化

Fig. 13 Case1 f versus a_3 at different a_1

3 结 论

在仅凹腔供油的条件下, 驻涡燃烧室燃烧效率和出口温度分布试验对几种凹腔前体组合件进行了研究, 通过结果分析可以得到以下几点结论:

1) 在其他条件不变的情况下, 燃烧效率随凹

腔当量比的增大而变小,其变化范围在 0.88~0.98 之间.在试验工况下,当凹腔当量比小于 1.5 时燃烧效率达到 95 %以上;凹腔后体进气量改变对出口温度分布均匀性影响较小;

2) 前体进气温度对燃烧效率几乎没有影响;凹腔前体进气温度提高有利于出口温度分布均匀, f 分布大体在 0.05~0.015 之间;

3) 燃烧效率随主流气量的减小而增大;主流气量减小,出口温度分布更均匀;

4) 相同条件下方案 1 的燃烧效率最高,方案 2 的出口温度分布均匀性最好;

5) 这种燃烧室在进口马赫数达到 0.33 的条件下,可以达到良好的燃烧效率和出口温度分布,经过进一步的试验验证后,具有在涡轮前或涡轮间应用的前景.

参考文献:

[1] Hsu K Y, Goss L P. Characteristics of a trapped-vortex

combustor [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1): 57-65.

[2] 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.

[3] Roquemore W M, Shouse D, Burrus D, et al. Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines [R]. AIAA 2001-0483.

[4] 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.

[5] Meyer T R, Brown M S, Fonov S, et al. Optical diagnostics and numerical characterization of a trapped-vortex combustor[R]. AIAA 2002-3863.

[6] Hendricks R C, Shouse D T, Roquemore W M. Water injected turbo machinery[R]. NASA/ TM-2005-212632.