

文章编号:1000-8055(2009)03-0547-05

燃用低热值燃料燃烧室试验

何 敏^{1,2}, 杨 灵², 冯大强², 钟华贵², 屈成泽²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国燃气涡轮研究院, 江油 621703)

摘 要: 对采用低热值气体燃料燃烧的某型发动机燃烧室进行试验研究,并对该燃烧室进行改进设计. 通过降低主燃区燃气速度和对燃料气进行预热以提高燃烧效率,通过对火焰筒头部及喷嘴进行改进以提高燃烧室出口温度,通过在火焰筒掺混段加掺混管来优化温度场. 试验研究表明:改进后的燃烧室其燃烧效率和出口温度优于原型燃烧室.

关 键 词: 试验研究; 低热值; 燃烧室

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Experimental study of combustor using low calorific value fuel

HE Min^{1,2}, Yang Ling², Feng Da-qiang², ZHONG Hua-gui², QU Cheng-ze²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. China Gas Turbine Establishment, Jiangyou 621703, China)

Abstract: Combustions of low calorific value gas fuel in aero engine combustor were investigated experimentally, and the design of the combustor was improved. The combustion efficiency was promoted by decreasing gas velocity of primary zone and heating gas fuel. Combustor exit temperature was increased by amendments of combustor dome and fuel nozzle, and combustor temperature distribution was optimized by adding dilution tube into dilution zone of combustor. The experimental research reveals that combustion efficiency and exit temperature profiles of improved combustor are better than the prototype combustor.

Key words: experimental study; low calorific value; combustor

随着国民经济的发展,能源需求不断增加,能源供给日益紧张.各国在积极开发新能源的同时,也在努力开展能源的再利用工作,以最大限度地节约能源.燃气轮机及其联合循环发电机组大大提高了发电效率,而且废气排放减少,利于环保,应用范围不断扩大.燃烧低热值燃料的燃气轮机将钢厂排放的高炉煤气,化工厂排放的低热值尾气等作为燃料,不仅提高了能源利用率,而且降低了对原生能源的需求,减小对大气的污染,越来越受到广泛的重视.但燃料的热值越低,其燃烧愈难以组织^[1],因此低热值燃料的点火、燃烧稳定性、

燃烧效率等多方面都面临着一系列难题.本文以某型发动机燃烧室为研究对象,进行改进设计及试验研究,意旨为低热值燃料燃气轮机的开发提供技术支持.

1 试验件及试验设备

燃烧室试验件由前后测量转接段、燃烧室机匣、某型发动机燃烧室、气体燃料喷嘴、高能点火系统等主要部件组成.

试验件前测量转接段上设置了进口气流总压、静压和总温测点;后测量转接段上设置了位移

收稿日期:2008-03-13; 修订日期:2008-09-20

作者简介:何敏(1976-),男,陕西山阳人,硕士生,主要从事航空发动机燃烧试验的研究.

机构,测量燃烧室出口温度和总压。

利用天然气(主要成分: CH_4) 与氮气(N_2) 按比例混合的办法获得各种热值的燃料,其系统的原理图如图1所示。在混合器内高热值天然气与氮气充分混合后形成试验所需的低热值气体,再经过滤器过滤杂质、V-Cone 流量计测量总流量后供入试验件。

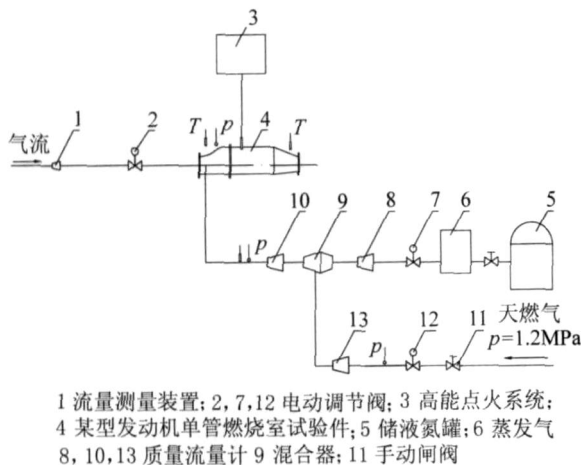


图1 某型发动机燃烧室低热值气体燃料试验原理图

Fig.1 Schematic diagram of low calorific value gas fuel experiment system in aero engine combustor

2 燃烧室改进设计及试验分析

某型发动机原型燃烧室是以航空煤油作为燃料燃烧的,航空煤油为高热值燃料,其燃烧机理与中低热值气体燃料有很大不同。一般来讲发热量 $11.3 (\pm 10\%) \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$ 为中热值燃料,发热量 $4.18 (\pm 10\%) \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$ 为低热值燃料,低热值燃料燃烧难以点燃和控制,燃烧时容易出现回火,其稳定燃烧不易实现^[2],且燃烧中低热值气体燃料时,更要求燃料在燃烧区的停留时间长,燃烧时间长则须加大主燃区长度、增大主燃区高度以降低参考速度。

2.1 原型燃烧室低热值燃料燃烧

为了在某型发动机燃烧室上进行低热值燃料燃烧性能试验,必须设计加工气体燃料喷嘴(1#),如图2所示。利用天然气掺混氮气模拟低热值燃料,并在某型发动机燃烧室改烧低热值燃料的设计点下进行试验研究。

当天然气与氮气的质量掺混比例分别为 1:1, 1:2, 1:3, 1:3.87 (对应热值分别为 $24\,350 \text{ kJ/kg}$ 、 $16\,233 \text{ kJ/kg}$ 、 $12\,175 \text{ kJ/kg}$ 、 $10\,000 \text{ kJ/kg}$) ,进入火焰筒头部的混气为恰当比时,其燃烧效率及温度随着天然气与氮气质量掺混比例的改变而变

化(如图3所示),其燃烧效率可根据温升法计算,即实际温升与理论温升的比值,其表达式为

$$\eta = \frac{T_{i4} - T_{i3}}{T_{i4th} - T_{i3}} \quad (1)$$

式中 T_{i4} 表示实际燃烧室出口平均温度, T_{i3} 表示燃烧室入口平均温度, T_{i4th} 表示理论计算的(完全燃烧时)燃烧室出口平均温度,利用燃烧过程前后焓值守恒计算得到^[3]。从图3可以看出,随着惰性气体 N_2 掺混比例的逐渐增多,即燃料热值的降低,燃烧室出口平均温度明显降低,燃烧效率大幅度下降。由于混气中加入了惰性组分,化学反应速率将会下降,即

$$\omega_{\text{带惰性组分}} = \varepsilon \omega_{\text{不带惰性组分}}$$

其中 ω 代表化学反应速率, ε 代表氧化剂与惰性气相混合时在混气中所占部分^[4],因此随着惰性气体 N_2 掺混比例的逐渐增多化学反应速率将会逐渐下降。

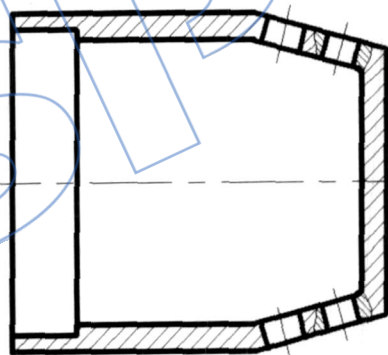


图2 1# 气体燃料喷嘴

Fig.2 Gas fuel nozzle of No.1

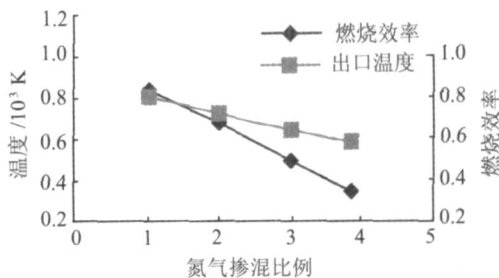


图3 氮气掺混比例与燃烧效率及出口温度曲线图

Fig.3 Combustion efficiency and exit temperature distributions with dilution ratio of N_2

2.2 燃烧效率的提高

某型发动机燃烧室烧低热值燃料,热值为 $10\,000 \text{ kJ/kg}$ 时燃烧效率很低,在不改变燃烧室结构尺寸的条件下,通过两方面措施加以解决:①降低主燃区燃气速度,增加燃气在火焰筒内的停留

时间,提高燃烧效率;②对燃料气预热,增大分子动能,提高化学反应速率。

将某型发动机燃烧室中间孔堵塞,并在掺混段开相应面积的孔,增加主燃区长度。图4为原型及两种堵孔方式下,火焰筒内沿程气流速度分布情况。由图4可以看出:随着火焰筒主燃区长度的增加,主燃区的气流速度明显下降,燃气在主燃区的停留时间增长。

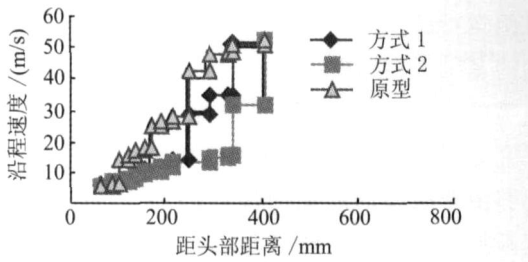
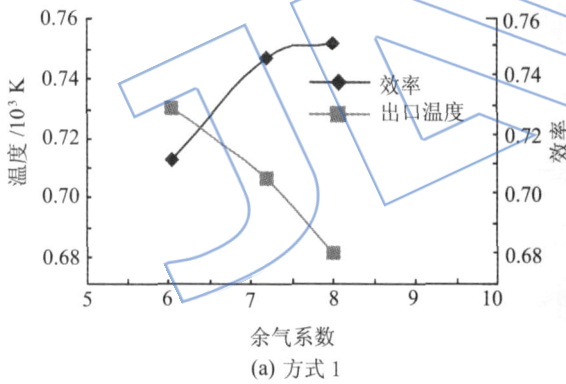


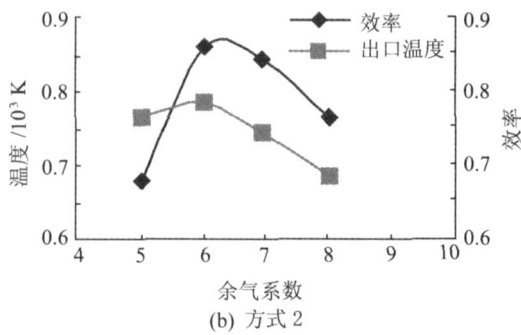
图4 火焰筒内沿程气流速度分布图

Fig.4 Gas velocity distribution of combustor along axial direction

图5(a),(b)分别为两种堵孔方式下燃烧室余气系数与燃烧效率及温度变化关系,随着燃气在火焰筒中的停留时间增长,燃烧效率得到了明显的提高。



(a) 方式1



(b) 方式2

图5 燃烧效率和出口温度随余气系数的变化 (方式1和方式2)

Fig.5 Variation of combustion efficiency and exit temperature with excess air coefficient (mode 1 and mode 2)

高温空气预热技术是利用预热燃料或空气达到增大燃烧速率,从而提高中低热值燃料燃烧的稳定性^[2,5]。本文通过对低热值燃料进行预热,加快了反应速率,稳定了燃烧,提高了燃烧效率。试验发现双预热方式(预热燃料和空气)的燃烧速率要比单预热方式(预热空气)的效率3%左右。

2.3 出口温度的提高及温度场的优化

在采取降速方法提高燃烧效率后,由于主燃区空气量减少,在化学恰当比条件下,主燃区加入的燃料量也降低,使燃烧室出口平均温度不高,采取了两种方法提高燃烧室出口温度:①略为牺牲燃烧效率,适当增大火焰筒头部进气量和燃料供应量;②在保证火焰筒头部恰当余气系数的情况下,提高燃料与空气混合的均匀性,从而提高燃烧速率。

将某型发动机燃烧室头部开适当的小孔,增大火焰筒头部空气量,并堵掉相应面积的掺混孔。图6为火焰筒头部空气量增大后燃烧室余气系数与燃烧效率及温度变化关系,随着头部空气量的增加,主燃区内气流速度逐渐增大,沿程停留时间减小,燃烧效率有所下降,但因参与燃烧的空气量

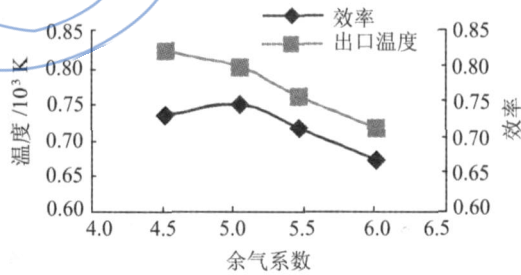


图6 头部空气量增大时燃烧效率和出口温度随余气系数的变化关系

Fig.6 Variation of combustion efficiency and exit temperature with excess air coefficient when increasing air mass flow of combustor dome

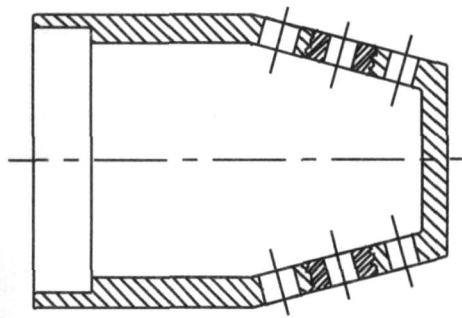


图7 2# 气体燃料喷嘴

Fig.7 Gas fuel nozzle of No.2

增多,相应参加燃烧的燃料也增多,出口温度明显提高。

重新设计加工气体燃料喷嘴(2#)如图7所示,将1#两排孔的气体燃料喷嘴改为2#三排孔的气体燃料喷嘴,其开孔个数增多,开孔面积增大,在相同余气系数下,射流速度减小,燃料与空气混合更加均匀。图8为燃料喷嘴改进后余气系数与燃烧效率及出口温度变化关系图,图8与图6比较,其出口平均温度增加,效率增大。

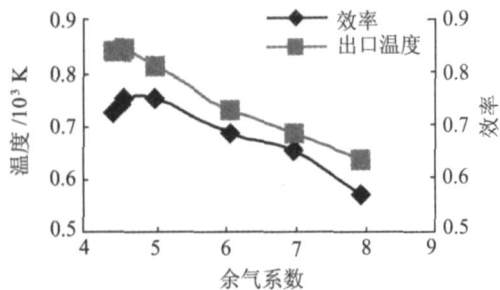


图8 燃料喷嘴改进后燃烧效率及出口温度随余气系数的变化关系

Fig.8 Variation of combustion efficiency and exit temperature with excess air coefficient through gas fuel nozzle improved

图9(a)为燃烧室出口温度分布图,由图9(a)看出中心偏右下方有一个核心热区。分析原因:随着主燃区增长,掺混区相应缩短,燃烧室出口温度

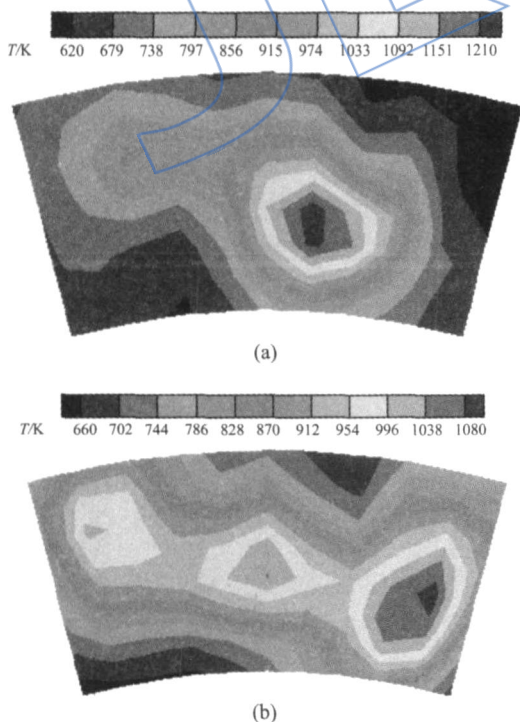


图9 燃烧室出口温度场分布云图

Fig.9 Exit temperature contours of combustor

场分布大大恶化。通过在火焰筒掺混段加掺混管来优化温度场,目的是将图9(a)中心偏右下核心热区打散。从试验的结果看燃烧室出口温度场分布大大改善,其出口温度场分布见图9(b)。

2.4 双燃料喷嘴

某型发动机燃烧室参考速度高,在燃烧低热值燃料时,低工况下燃烧稳定性及点火特性差,必须在低工况下使燃烧室改烧高热值燃料,以确保机组运行的稳定性。因此,在2#气体燃料喷嘴结构的基础上,将喷嘴中间开大孔,增加了液体燃料喷嘴的设计,其结构简图如图10所示。经过试验研究,此种结构的双燃料喷嘴能够可靠点火,并且能够由柴油带动启动到慢车(55%转速),慢车后逐渐加入低热值燃料带动到设计点后停油。

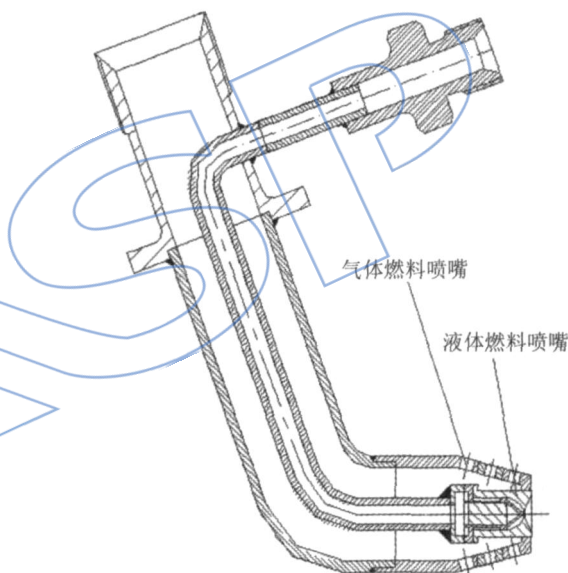


图10 双燃料喷嘴示意图

Fig.10 Schematic drawing of dual fuel nozzle

3 结论

- 1) 随着气体燃料中惰性气体组分比例的增加,即燃料热值的下降,化学反应速率明显下降,燃烧效率将严重恶化。
- 2) 燃烧室头部混气温度对化学反应速率影响较为明显,采用适当措施提高气体燃料温度,可以改善燃烧稳定性,并提高燃烧效率。
- 3) 通过增加主燃区长度,降低主燃区气流速度,增加燃气的滞留时间,可有效提高燃烧效率。
- 4) 采用掺混管方式,可有效改善燃烧室出口温度的分布。
- 5) 双燃料喷嘴的采用,可解决燃机的启动问题,确保机组运行的稳定性。

参考文献:

- [1] 娄马宝. 低热值气体(包括高炉煤气)的利用[J]. 燃气轮机技术, 2000, 13(3): 16-18.
- [2] 赵黛青. 低热值燃料稳定燃烧的研究现状与进展[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(25): 33-39.
- ZHAO Daiqing. Research and development of stable combustion using low heat value fuel[J]. World Sci-tech R & D, 2005, 27(5): 33-39.
- [3] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1988: 17.
- [4] 傅维标, 卫景彬. 燃烧物理学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 23-24.
- [5] Katsuki M, Hasegawa T. The science and technology of combustion in highly preheated air[C]// 27th Symposium (International) on Combustion. Colorado: The Combustion Institute of University of Colorado, 1998: 3135-3147.

王保国教授的论文获第六届中国科协期刊 优秀学术论文奖

在 2008 年中国科协举办的第六届中国科协期刊优秀论文评选活动中,北京理工大学教授等 5 人 2005 年 8 月 在《航空动力学报》发表的论文“双时间步长加权 ENO-强紧致高分辨率格式及在叶轮机械非定常流动中的应用”获优秀学术论文奖.中国科协向论文作者、期刊出版单位和期刊的主办学会颁发了荣誉证书.

第六届中国科协期刊优秀学术论文奖的评选范围为:自 2003 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日发表的学术论文.由有关专家推荐,并经过 122 个全国学会组织的专家评审,最终由中国科协期刊优秀学术论文评审委员会进行论文审核和论文等级评定.中国航空学会主办的期刊中共有 4 篇学术论文荣获第六届中国科协期刊优秀学术论文.其中除了王保国教授等人发表在《航空动力学报》上的学术论文获奖外,王浩文等 2 人 2004 年 2 月发表在《中国航空学报(英文版)》上“Rotor Vibratory Load Prediction Based on Generalized Forces”,魏彤等 2 人 2007 年 5 月发表在《航空学报》上“磁悬浮高速转子系统双频 Bode 图稳定性分析方法研究”,刘福顺等 6 人 2003 年 3 月发表在《航空学报》上“EB-PVD 热障涂层对激光打孔孔径及热循环后孔径变化影响的研究”也获优秀学术论文奖.

中国科协期刊优秀学术论文评选活动每年举办一次.2003 年第一届中国科协期刊优秀论文评选中,《航空动力学报》2002 年第 5 期发表的北京航空航天大学傅惠民教授的论文获得优秀学术论文奖.

航空动力学报