

基于燃气分析法的航空发动机燃烧室性能研究

李亚娟,王明瑞,葛新,韩冰,马征,贾琳妍

(中航工业沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

摘要:为深入了解燃烧室性能,用燃气分析法测量了燃烧室在高压状态下的气态污染物排放和排气冒烟,用热电偶法测量了燃烧室出口温度场。混合式取样器安装于摆盘上,随摆盘沿周向匀速旋转采集样气,通过测试仪器分析样气组分,计算得到了燃烧室的油气比、燃烧效率、污染物排放指数及冒烟数。通过比较采用燃气分析法和流量法得到的油气比、燃烧效率的测试结果,分析了慢车状态误差偏高的原因,结果表明:燃气分析法是 1 种准确、可靠的燃烧室性能测试方法。改进了混合式取样器结构,提高了排气冒烟测试的精度。

关键词:燃气分析;气态污染物;冒烟数;摆动测量;取样器;航空发动机

中图分类号:V231.2

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.01.008

Research on Aeroengine Combustor Performance Based on Gas Analysis Method

LI Ya-juan, WANG Ming-rui, GE Xin, HAN Bing, MA Zheng, JIA Lin-yan

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shengyang 110015, China)

Abstract: In order to understand combustor performance, a gas analysis system was used to measure gaseous emission and smoke, the thermocouple was used to measure temperature field for understanding combustion performance in high pressure state. The mixed sampler was installed on a swing plate which moved regularity in circle. The gas component was got through test instrument. The fuel air ratio, combustor efficiency, gaseous emission and smoke number were calculated. The fuel air ratio was compared by gas analysis and measuring flow as well as the combustor efficiency by gas analysis and thermocouple. The reason of high error was analyzed in ground idle condition. It indicates that the gas analysis method is an accurate and reliable method of testing combustion performance. Mixed sampler was improved to get exact smoke number.

Key words: gas analysis; gaseous pollutant; smokenumber; swing measurement; sampler; aeroengine

0 引言

随着高性能航空发动机的研制不断推进,军用航空燃气轮机向着大推重比方向发展,燃烧室出口平均温度已达到 2000 K,热点温度已达到 2300 K,对温度场测量提出了很大挑战,燃气分析法成为大状态温度场测量的主要手段。随着对环境保护的日益重视,各国对燃气轮机的污染物排放提出了更加严格的要求,2014 年开始实施的发电厂用燃气轮机污染物排放标准规定:以油为燃料的燃气轮机组,氮氧化物(以 NO_2 计)排放不超过 120 mg/m^3 ;以天然气为燃料的燃气轮机组,氮氧化物排放不超过 50 mg/m^3 ;其它气体燃料

氮氧化物排放不超过 120 mg/m^3 ;以油、气体为燃料的燃气轮机组的林格曼黑度不超过 1^[1]。低污染燃烧室的研制成为燃气轮机发展的方向之一,而作为检测污染物排放的燃气分析方法成为燃气轮机研制过程中最重要的测试手段之一^[2-6]。

本文介绍了气态污染物排放和燃烧效率燃气分析测试系统以及排气冒烟测试系统,利用燃气分析法和电偶法对某航空发动机燃烧室进行了试验研究。

1 燃气分析测试系统

燃气分析法是通过取样装置把燃气引入测量仪器进行成分分析,再利用燃气成分数据计算燃烧效

收稿日期:2015-06-04 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:李亚娟(1988),女,工程师,从事燃气分析工作;E-mail:liyajuanhit@163.com。

引用格式:李亚娟,王明瑞,葛新,等.基于燃气分析法的航空发动机燃烧室性能研究[J].航空发动机,2016,42(1):37-41. LI Yajuan, WANG Mingrui, GE Xin, et al. Research on aeroengine combustor performance based on gas analysis method[J]. Aeroengine, 2016,42(1):37-41.

2.1 油气比及燃烧效率的测试结果分析

油气比通过燃气分析法和流量法 2 种方式进行测试,燃烧效率通过燃气分析和电偶法测量。燃气分析法通过测量燃气组分计算得到燃烧效率与油气比,具体计算公式见文献[10]。

流量法油气比通过测量燃烧室进口燃油流量和空气流量计算得到。燃油流量采用涡轮流量计测得,精度为 $\pm 0.5\%$,空气流量采用流量孔板测量,试验前流量孔板用临界流文丘里喷嘴校准,其误差分布如图 4 所示。从图中可见,当空气流量大于 20 kg/s 时,空气流量的测量误差小于 1%;而在小于 20 kg/s 时,空气流量的测量误差较大;当空气流量在 10 kg/s 时,误差约为 2.5。在燃油流量控制精确的情况下,试验的油气比误差将由空气流量误差导致。

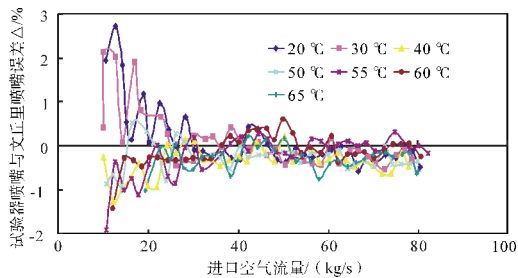


图 4 试验喷嘴相对标准喷嘴误差

油气比和燃烧效率的试验结果分别见表 2、3。从表 2、3 中可见,在状态 2~5% 下,油气比的偏差为 $-0.95\% \sim -1.41\%$, 燃烧效率的偏差为 $3.94\% \sim 4.85\%$, 表现出良好的稳定性和重复性,而在状态 1 下,油气比较其他状态的平均偏差大 3.32% ,燃烧效率的偏差较其他状态的平均偏差大 3.76% 。

表 2 油气比数据

试验状态	油气比		
	流量法	燃气分析法	误差 /%
1	0.01160	0.01136	2.11
	0.01160	0.01137	2.02
2	0.02379	0.02413	-1.41
	0.02373	0.02407	-1.41
3	0.02839	0.02879	-1.39
	0.02839	0.02873	-1.18
4	0.02870	0.02908	-1.31
	0.02872	0.02904	-1.10
5	0.03023	0.03063	-1.31
	0.03027	0.03056	-0.95

表 3 燃烧效率数据

试验状态	燃烧效率 /%		偏差 /%
	燃气分析法	热电偶法	
1	94.34	86.21	8.13
2	99.32	95.38	3.94
3	99.92	95.94	3.98
4	99.92	95.21	4.71
5	99.92	95.07	4.85

燃气分析误差精度在 1.1% 以内^[4],燃油流量的测量误差小于 0.5%, 通常热电偶测量的温度误差随着测量温度的升高而增大,在慢车状态下由于排气温度较低, 测量温度的精度较高,8.13% 的燃烧效率偏差明显不合理,初步确定燃烧效率和油气比的偏差扩大是由空气流量测量误差引起的。

首先以燃气分析油气比为基准,以慢车状态与状态 2~5 的平均偏差的差值对慢车状态的流量法油气比进行修正,在慢车状态下的油气比为 0.01099,再以此油气比及热电偶测量的燃气温度通过焓值法重新计算得到的燃烧效率为 91.07%, 与采用燃气分析法得到的燃烧效率的偏差变为 3.27%。燃气分析法计算燃烧温度在不高 于 1200 °C 时, 采用平均定压比热法,在高于 1200 °C 时,考虑热离解作用采用焓值法,热电偶燃烧温度的计算采用焓值法。热电偶燃烧效率修正后显示随着燃气温度的提高,采用热电偶温升法测量的燃烧效率与采用燃气分析法测量的燃烧效率偏差有增大的趋势, 这是由热电偶的测量原理引起的,热电偶测温精度的影响因素较多,如环境温度、偶丝固定端温度、隔热罩黑度、气流外壁面温度、偶丝表面的催化效应等^[2],随着被测燃气温度的升高,热辐射和对流换热损失的增加导致测量温度与燃气实际温度误差增大,进而导致燃烧效率的误差变大。燃气分析测量不受环境因素影响,误差来源较为稳定。

通常航空发动机或燃气轮机主燃烧室燃烧效率在慢车状态下的设计指标为 98.5%,在其他状态下为 99.5% 以上^[13-15],试验件在慢车状态下的燃烧效率仅为 94.34%,远低于设计指标,表明在慢车状态下燃油雾化和油气匹配需要改善。

此外,由于燃烧室在不同工作状态下的空气流量变化很大,而试验器用于测量空气流量孔板的量程比一般为 3, 超过工作范围就会导致测量精度大幅下降,应采用分级测量或更换更大量程比的流量测量装

置,以适应发动机燃烧室的工作范围。

2.2 气态污染物测试结果分析

航空发动机气态污染物测试包括对一氧化碳、氮氧化物和未燃碳氢的排放含量的测试。用燃气分析法测得几种物质的排放指数,计算公式见文献[10]。

气态污染物随油气比的变化趋势如图 5 所示。气态污染物排放指数见表 4,CO 和 THC 的排放指数随着油气比的增大而减小,NO_x 的排放指数随着油气比的增大而增大。当油气比大于 0.028 时,CO 和 THC 的排放指数接近于 0。

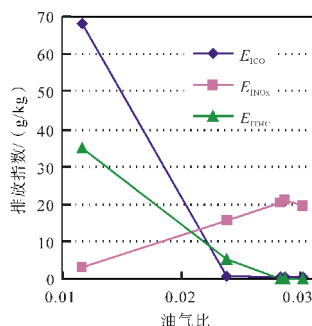


图 5 气态污染物随油气比的变化趋势

表 4 气态污染物排放指数

序号	油气比	燃气分析法排放指数/(g/kg)		
		CO	NO _x	THC
1	0.01137	67.92	3.27	35.14
2	0.02410	0.62	15.55	5.29
3	0.02876	0.27	20.43	0
4	0.02906	0.23	21.27	0
5	0.03060	0.27	19.65	0

2.3 排气冒烟测试结果

用取样器进行燃气取样,完成 2 次燃气冒烟数的测试(分别如图 2、6 所示)。取样器混合腔为方形结构(图 2),燃气很容易在方形结构的边角处形成旋涡,在测航空发动机燃烧室排气冒烟时,固体的燃气颗粒会积聚在方形结构的边角处,造成冒烟数的测量值偏低。考虑到混合腔的影响,对取样器的结构进行优化,将混合腔改为锥形结构,如图 6 所示。依照 HB6116-1987 要求对燃烧室排气冒烟进行测试。2 次排气冒烟测试数据见表 5,第 1 次测试采用如图 2 所示的取样器,第 2 次测试采用如图 6 所示的取样器,2 次测试均无可见冒烟。但第 2 次测试的冒烟数明显大于第 1 次测试的,并且冒烟数随着试验油气比的增大而增大,符

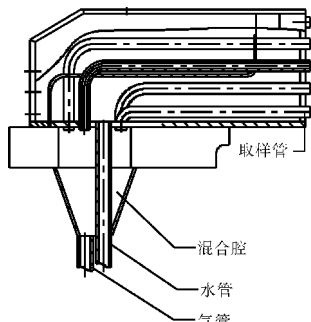


图 6 改进后的取样器结构

合燃烧室排放规律,证实了在测量航空发动机固态污染物时,锥形混合腔结构要优于方形混合腔结构,使取样器结构得到进一步优化,提高了排气冒烟的测试精度。

表 5 排气冒烟测试结果

序号	油气比	冒烟数 SN	
		第 1 次测试	第 2 次测试
1	0.011	0.72	2.50
2	0.024	1.20	4.21
3	0.028	0.11	3.97
4	0.029	0.11	5.61
5	0.030	0.00	5.86

3 结论

- (1)通过分析慢车状态误差偏高的原因,表明了燃气分析法是 1 种准确、可靠的燃烧室性能测试方法;
- (2)改进的取样器混合方式有效地防止了固体颗粒物在混合腔内的堆积,提高了排气冒烟的测试精度;
- (3)摆动测量方式能实现整个取样截面上的样气收集,使取样更具代表性,测试结果更接近真实值。

参考文献:

- [1] 中国环境科学研究院. GB13223-2011 火电厂用燃气轮机污染物排放标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2011:4-6.
Chinese Academy of Environmental Sciences. GB13223-2011 Aero gas turbine engine exhaust emission specification for power plant [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011:4-6.
- [2] 刘高恩,王华芳,吕品,等. 飞机发动机排气污染物的测量[J]. 航空动力学报,2003,18(3):348-352.
LIU Gaoen, WANG Huafang, LYU Pin et al. Gas turbine engine emissions measurement [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3): 348-352. (in Chinese)
- [3] 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,2008:189-250.
LIN Yuzhen, XU Jinhong, LIU Gaoen. Gas turbine combustor [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:189-250. (in Chinese)
- [4] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室 [M]. 北京:中国宇航出版社,1988:446-463.
JIN Rushan. Aero gas turbine combustor [M]. China Astronautic Publishing House, 1988:446-463. (in Chinese)
- [5] Williamson R C, Stanforth C M. Measurement of jet engine combustion temperature by the use of thermocouples and gas analysis [J]. SAE Paper, 1969:1-19.
- [6] Colket M B. Internal aerodynamics of gas sampling probes[J]. Combustion and Flame, 1982, 44:3-14
- [7] 吴寿生,王华芳. HB6116-1987 航空燃气涡轮发动机排气冒烟测试

- 规范[S]. 北京:北京航空学院,1987:2-9.
- WU Shousheng, WANG Huafang. HB6116-1987 Aero gas turbine engine exhaust smoke measurement specification[S]. Beijing: Beijing Aviation Institute,1987:2-9.(in Chinese)
- [8] 王华芳, 吴寿生. HB6117-1987 航空燃气涡轮发动机气态污染物的连续取样及测量程序规范[S]. 北京:北京航空学院,1987:3-21.
- WANG Huafang, WU Shousheng. HB6117-1987 The exhaust emission continuous sampling and measurement program specification of aeroengine. [S]. Beijing: Beijing Aviation Institute,1987:3-21.(in Chinese)
- [9] 周琦, 于培敏, 张华. GB/T 11369-2008, 轻型燃气轮机烟气污染物测量[S]. 北京:中国航空工业第一集团公司,2008:2-4.
- ZHOU Qi, YU Peimin, ZHANG Hua. GB/T 11369-2008 Exhaust emission measurement of light-weight gas turbine engine [S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 2008:2-4.
- [10] 王明瑞. 航空燃气涡轮发动机燃气分析测试及计算方法[R]. 沈阳: 沈阳发动机设计研究所,2013:10-18.
- WANG Mingrui. Gas analysis test and calculation method of aero-engine [R]. Shenyang Engine Design and Research Institute, 2013: 10-18.
- [11] 王明瑞, 贾琳妍, 韩冰. 航空燃气涡轮发动机燃气分析测试及计算方法[J]. 航空动力学报,2014,30(11):2568-2574.
- WANG Mingrui, JIA Linyan, Han Bing. Gas analysis test and calculation method of aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power,2014, 30(11):2568-2574.
- [12] 王明瑞, 刘春宇. 航空发动机气态污染物及冒烟的测量[J]. 航空发动机,34(1):35-37.
- WANG Mingrui, LIU Chunyu. Measurement of gaseous pollutant and smoke from an aeroengine[J]. Aeroengine,34(1):35-37.(in Chinese)
- [13] 陈大光, 曹玉璋, 马瑞麟, 等. 航空发动机设计手册:第 1 册[M]. 北京:航空工业出版社,2000:597-688.
- CHEN Daguang, CAO Yuzhang, Ma Ruilin. The design manual of aeroengine: 1st album [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2000: 597-688.(in Chinese)
- [14] 胡正义, 江义军, 赵清杰, 等. 航空发动机设计手册:第 9 册[M]. 北京:航空工业出版社,2000:27-37.
- HU Zhengyi, JIANG Yijun, ZHAO Qingjie. The design manual of aeroengine: 9th album [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2000: 27-37.
- [15] 张洪飏, 李志广, 陈浚, 等. 航空发动机设计手册:第 11 册[M]. 北京:航空工业出版社,2001:1-19.
- ZHANG Hongbiao, LI Zhiguang, CHEN Jun. The design manual of aeroengine: 11th album [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2001: 1-19.

(编辑:张宝玲)