

航空发动机单头部低污染燃烧室试验研究

贾林培, 罗谦

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:对航空发动机单头部矩形燃烧室进行了污染排放试验。设计了满足 CAEP 标准的燃气取样分析系统以及单头部燃烧性能试验系统,研究了单头部燃烧室不同的进口油气比对污染物排放和燃烧效率的影响规律。试验结果表明:在给定进口空气压力、进口空气流量和进口温度的条件下,随着进口油气比的增大,单位质量燃油产生的 CO、NO 和未燃碳氢均降低;而 NO 体积分数由于燃烧温度的增加越来越大;燃烧效率越来越高,燃烧更充分。

关键词:航空发动机;燃烧室;污染物排放;燃烧效率;油气比

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)03-0063-04

Experiment on Low Emission of Aero-engine Single Head Combustor

JIA Linpei, LUO Qian

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Pollutant emission experiment is made on single head rectangular combustion of aero-engine. This paper designs a gas sampling analysis system and a single head combustion performance experiment system which satisfy the CAEP standard, then, makes a study of the influence rule of different fuel air ratio on pollutant emission and combustion efficiency. The experiment results show that under the conditions of given inlet air pressure, inlet air flow and inlet temperature, with the increase of the inlet fuel air ratio, the CO, NO and unburned hydrocarbon produced by unit mass fuel oil all decrease, while the concentration of NO increases with the increase of the combustion temperature. The combustion efficiency is higher and higher, and the combustion is more sufficient.

Keywords: aero-engine; combustor; pollutant emission; combustion efficiency; fuel air ratio

0 引言

燃烧室是航空发动机中三大核心部件之一,功能是将燃料的化学能转换成燃气的热能,其性能的好坏直接影响航空发动机的总体性能^[1],因此研制出一种燃烧效率高、流动阻力小、工作状态稳定、点火可靠、低污染排放、出口温度高且分布合理的高热容、高性能燃烧室是当今航空发动机研制中一项十分重要的任务^[2]。

发动机污染物的排放与燃烧室的结构设计、喷嘴的雾化与蒸发、燃烧情况、燃料种类和燃烧室的运行工况等参数密切相关。航空发动机使用航空煤油作为燃料,其燃烧污染物含量和含氧量都可以忽略不计,所以,航空发动机主要燃烧污染物有未燃碳氢化合物(UHC)、CO、NO_x和冒烟等^[3-4]。这些有害物质体积分数与燃烧室内气流温度、燃油雾化掺混以及发动机工作状态等有关。航空发动机在不同工作状态下各种污染物排放情况如图1所示,其中在低功率状况下CO和UHC体积分数最大,随着推力的增加,燃烧效率逐渐增加,CO和UHC体积分数下降;相反,氧化氮NO_x体积分数在低功率时较小,而在大状态时,随着燃烧温度的增加,NO_x达到最大值^[5-7]。因此污染物CO和NO_x的体积分数是一对矛盾体,同时获得较低

CO和NO_x排放需要综合考虑,因此对于单头部燃烧室的污染物排放必须要通过试验来进行分析。

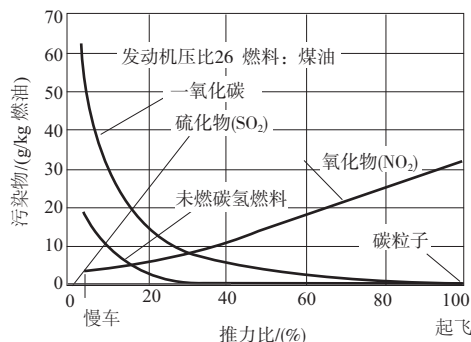


图1 发动机排气污染特性

1 试验系统与试验方案

1.1 试验系统

本文对某一单头部矩形燃烧室进行燃烧性能试验研究。该单头部矩形燃烧室主要结构有扩压器、燃烧室机匣、电嘴、双路燃油喷嘴、火焰筒以及旋流器等。

为了测量某单头部矩形燃烧室燃烧性能与污染物排放特性,首先设计了单头部燃烧室高温高压燃烧试验测量系统^[8],如图2所示,并进行了相应的加工与装配,实物如图3所示。整套试验系统主要包括前测量段、燃烧试验段、后测量段、水冷段、喷水冷却段、高温高压阀门以及波纹管等。从压气机出来的高压气体先经高压气罐进行稳压后,经高压管道分别流经涡街流量计和孔板流量计,经流量校准测量后,进入电加热器,由电加热器直接加热到试验所需求的进口总温。高温高压空气进入前测量段,通过前测量段上布置的单点热电偶、单点静压管及3个单点总压管分别测量其进口总温、进口静压和进口总压,通过调节进口空气高压阀门开度,满足进口空气流量要求;接着高温高压气体进入燃烧试验室进行喷油燃烧,通过调节燃油阀门开度,满足进口喷入的燃油流量。燃烧后的高温高压燃气进入后测量段,经后测量段上的取样耙和总温耙,分别测量得到出口截面上的4点出口总压、1个出口总温和8点出口燃气成分。燃气流经水冷段和喷水冷却段降温到600℃以下,从而满足后面高温高压阀门长期工作温度的要求。通过调节高温高压阀门的开关来建立燃烧室中所需的工作压力,经过高压阀门后的燃气迅速降为常压,再通过一段高温波纹管和一个偏心法兰连接段与大气罐相连,在大气罐中经过喷水冷却与处理后,流经烟囱,排入大气。

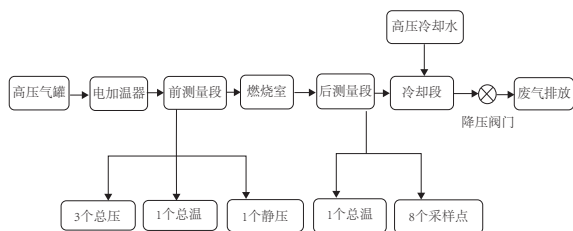


图2 试验系统示意图



图3 试验系统实物图

1) 数据测量系统

试验需要同时测量燃烧室的进口气流参数和出口燃气参数。主要包括3个进口总压、1个进口总温、1个进口静压、4个出口总压、1个出口总温和8个出口燃气成分。在对前5个参数进行测量时,都是将热电偶或压力变送器的信号接入数据采集卡,经PCI-1002板卡进行数据采集。在计算机中使用自编程序软件将温度和压力信号转变成实际的温度和压力,并进行储存(1秒钟存储3个数据)。而出口燃气成分在测量仪器前要通过相应的阀门转换,来实现不同取样点燃气成份的测量。

为了保证燃烧室出口燃气的取样温度满足CAEP标准要求,在取样气体的管路上布置了1个K型热电偶,对取样气体的温度进行实时监测,当燃气温度不满足CAEP样气温度要求时,通过调节取样耙上冷却水的流量来实现。当样气温度低于60℃,则减少取样耙上冷却水流量,从而提高样气温度;当样气温度高于160℃,则增大取样耙上冷却水流量,从而降低样气温度,最终保证燃气取样气体的温度满足CAEP标准要求。

2) 出口燃气分析系统

经取样耙取出的燃气,首先进入带保温的样气流通管道,以保证取出的样气在流通管道中温度基本保持不变。如果是中间取样耙取出的燃气首先要经过三通阀门:一股进入总压测量的压力变送器,另外一股接入保温管道,而1/4处取样耙取出的样气则直接进入保温管道,分别流入两段电加热保温段。该保温段通过电加热方式,能够对取出的样气进行加热,如图4所示。UHC气体分析要求的保温温度为160℃,而气体分析要求的保温温度为65℃,样气通过保温管道和两条电加热保温段,从而保证了进入气体分析仪的样气温度满足CAEP6标准中的测量要求。

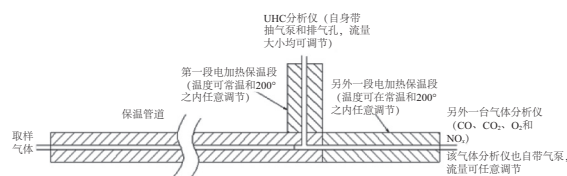


图4 样气保温系统示意图

试验中使用的烟气分析仪为XGF-404型气体分析仪,其中核心模块为德国西门子公司的U23红外气体连续分析模块、F6测定碳氢化合物总含量的气体分析模块和C6导热气体分析模块。U23可以测定被测气体中CO、CO₂、O₂、NO、CH₄的体积分数,F6可以测定UHC的体积分数,C6可以测定H₂的体积分数。其中由于CO、NO和UHC的体积分数很小,因此气体分析仪中这两种气体成分的单位为‰,即体积分数的千分之一。但是CO、NO和UHC的体积分数表示该进口条件下试验结果,为使试验结果更具意义,将其试验测量得到的体积分数转换为EI指标。具体的转换关系根据CAEP6标准中现成的计算公式进行转换,具体公式为:

$$EI_p(\text{组分 } p \text{ 排放指数}) = \frac{\text{产物质量/g}}{\text{燃油质量/kg}}$$

$$EI(\text{CO}) =$$

$$\left(\frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{CO}}}{M_c + (n/m) M_H} \right) (1 + T(P_0/m))$$

$$EI(\text{HC}) =$$

$$\left(\frac{[\text{HC}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{HC}}}{M_c + (n/m) M_H} \right) (1 + T(P_0/m))$$

$$EI(\text{NO}) =$$

$$\left(\frac{[\text{NO}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{NO}}}{M_c + (n/m) M_H} \right) (1 + T(P_0/m))$$

式中:

$$P_0/m = \frac{2Z - n/m}{4(1 + h_{vol} - [TZ/2])};$$

$$Z = \frac{2 - [\text{CO}] - ([2/x] - [y/2x]) [\text{HC}] + [\text{NO}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]}$$

其中: $M_{\text{HC}} = 16.043 \text{ g}$; $M_{\text{CO}} = 28.011 \text{ g}$; $M_{\text{NO}} = 30.008 \text{ g}$; $M_c = 12.001 \text{ g}$; $M_{\text{H}} = 1.008 \text{ g}$; $T = 0.0003$; $x = 1$; $y = 4$; $n = 12$; $m = 23$ 。

根据上述计算公式,把从气体分析仪测量得到的 CO、NO 和 UHC 的体积分数转换为 EI 值。

1.2 试验方案

试验阶段,调节进口总压和进口总温,并且保证进口空气流量比较小时,控制油气比 0.02 左右进行喷油点火。待点火成功后,稳定燃烧,然后再调节空气流量、进口总压、进口总温和燃油流量。当进口参数均稳定并且满足某一个试验工况的进口参数时,进行燃烧室该工况条件下的进口参数(进口空气流量、进口总压、进口静压、进口总温以及进口燃油流量)、出口参数(出口总压)等数据的实时数据采集,而污染物排放数据通过气体分析仪进行测量。该工况测量全部完成后,关油熄火,并关电加热器开始降温,试验系统的温度冷却到一定范围后,再关闭气源以及相关的冷却水,从而完成一个试验工况的污染排放测量。同时本文对单头部矩形燃烧室在不同状态下的污染物排放特性的试验测量结果进行了对比分析。

试验研究了 6 种进口油气比对单头部燃烧室燃烧性能的影响,试验中保证进口空气温度为 145°C ,空气质量流量为 160 g/s ,进口空气压力为 200 kPa ,进口油气比分别为 0.007、0.01、0.014、0.018、0.022、0.025。

2 试验结果分析

在污染物排放试验过程中,测量燃烧室的出口燃气中 NO_x 、CO、 CO_2 、UHC、 H_2 、 O_2 、 CH_4 等气体的体积分数,进出口总压与静压、进口总温、进口燃油流量和进口空气流量,并根据试验数据计算出总压损失系数、燃烧效率以及污染物 EI 指标等参数。

在给进口空气流量和进口空气温度条件下,通过改变燃油流量来调节进口油气比。本文分别研究了 6 种不同油气比对单头部燃烧室燃气成分和燃烧效率等的影响(图 5-图 11)。

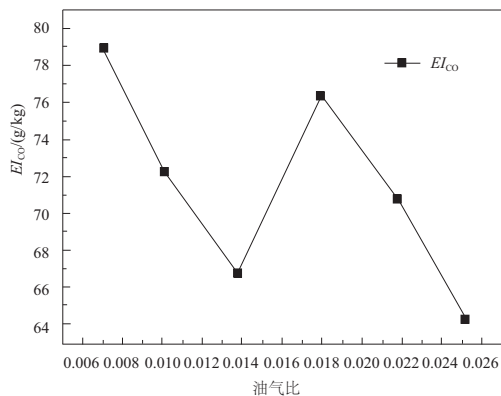


图 5 EI_{CO} 与油气比的关系图

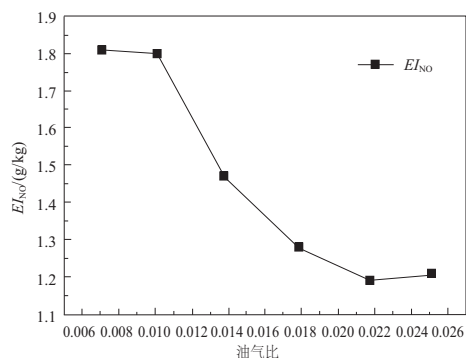


图 6 EI_{NO} 与油气比的关系图

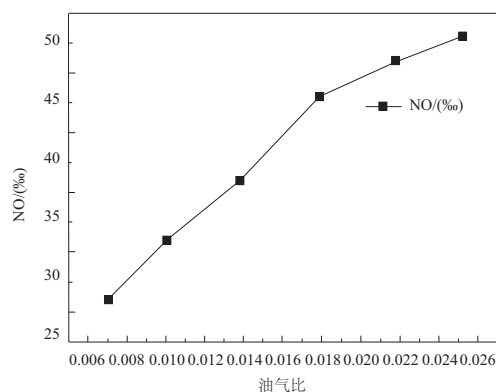


图 7 NO 体积分数与油气比的关系图

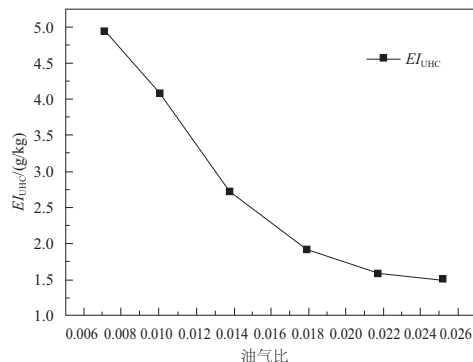


图 8 EI_{UHC} 与油气比的关系图

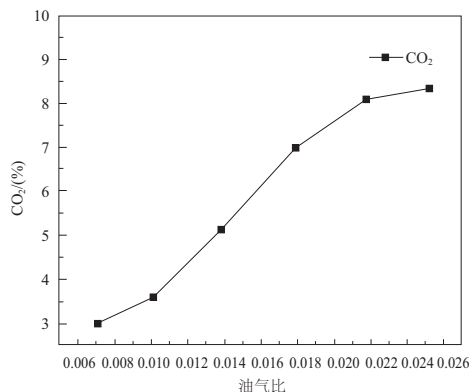


图 9 CO_2 体积分数与油气比的关系图

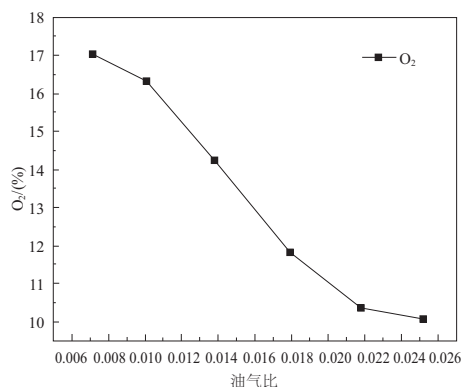
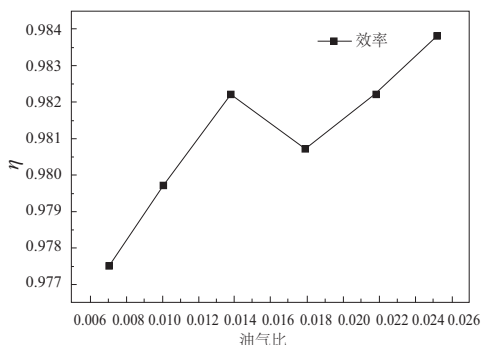
图 10 O₂ 体积分数与油气比的关系图

图 11 燃烧效率与油气比的关系图

由图 5 可以看出,随着油气比的增大, EI_{CO} 的变化趋势为先减小后增加再减小。因为在小燃油流量条件时,只打开了副油路,随着油气比的增加,燃油雾化效果逐渐变好,燃烧更充分,燃烧效率提高,CO 转换为 CO_2 ,因此 CO 占比逐渐减小。当燃油流量上升到一定值后,主油路打开,此时主油路燃油流量很少,雾化很差,燃烧效率较差,因此 CO 体积分数较高。随着油气比的继续增大,主油路的燃油流量逐渐增加,雾化逐渐变好,CO 体积分数开始逐渐降低。由图 6 和图 7 可知,随着油气比的增加, EI_{NO} 逐渐降低,而 NO 体积分数升高。因为随着油气比增加,燃烧温度增加,热力 NO 生成量增大,因此生成的 NO 体积分数逐渐增加;虽然出口中 NO 的体积分数在逐渐升高,但是单位时间内进入燃烧室的燃油量也在增多,因此单位燃油量产生的 EI_{NO} 反而降低。图 8 中的 EI_{UHC} 逐渐降低,

因为随着油气比的增大,燃烧室内燃油反应更加充分,所以 UHC 量逐渐降低。由图 9 和图 10 可知, CO_2 的体积分数上升,而 O_2 的体积分数下降。因为随着油气比的增大,燃烧室内的燃油量逐渐增多,燃烧所消耗的 O_2 量逐渐增大,而进口空气量不变,所以 CO_2 的体积分数上升, O_2 的体积分数下降。图 11 为根据燃气分析法计算出的燃烧效率,燃烧效率随油气比的变化规律与 CO 的变化规律相反,因为未燃烧产物中 CO 体积分数相比 UHC 和 CH_4 等,要大一个数量级以上,因此燃烧效率主要受 CO 体积分数变化规律的影响,所以燃烧效率的变化规律与 CO 体积分数的变化规律相反。

3 结语

本文对单头部矩形燃烧室高压条件下燃烧性能进行了试验研究,研究了不同的油气比对污染物排放的影响规律。试验结果表明:在给定进口空气压力、进口空气流量和进口温度的条件下,CO、NO 和未燃碳氢的污染物排放指标随着油气比的增大而降低,但是 NO 体积分数由于燃烧温度的增加越来越大,燃烧效率随着油气比变化规律与 CO 的变化规律基本一致。

参考文献:

- [1] 党新宪,赵坚行,吉洪湖. 试验研究双旋流器头部燃烧室几何参数对燃烧性能影响[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1639-1645.
- [2] 黄勇. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.
- [3] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 986-996.
- [4] 吴大观. 再论科学预研对航空发动机发展的重要性[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1998, 11(2): 1-3.
- [5] 乔征. 燃气轮机燃烧室 NO_x 排放的数值研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [6] 王迪. 燃气轮机燃烧室污染生成的数值分析[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2010.
- [7] 党新宪,赵坚行,吉洪湖. 双旋流器燃烧室 NO_x 生成研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 430-435.
- [8] 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, 2008, 34(1): 35-37.

收稿日期:2019-03-06