

航空燃气涡轮发动机燃气分析 测试及计算方法

王明瑞¹, 肖 阳², 韩 冰¹, 贾琳妍¹

- (1. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015;
2. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对航空燃气涡轮发动机整机及燃烧室部件试验的燃气分析测试, 介绍了测试的原理和系统组成, 完善了液体碳氢燃料的计算方法, 发展了气体燃料的计算方法; 分析了燃气组分测量值误差对燃烧参数计算结果的影响, 讨论了取样方式及混合式取样器结构的影响, 给出了混合式取样器结构是否合理的判定条件; 对比了高压全环燃烧室试验的燃气分析和常规测试的结果, 结果表明: 使用设计合理的混合式取样器、保证足够的测点密度和使用合理配置的燃气分析测试系统, 余气系数的测量精度优于 5%, 并对热电偶法和燃气分析法燃烧效率偏差进行了分析。

关键词: 燃气分析计算方法; 误差分析; 燃烧室性能; 燃气取样; 燃烧效率

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Gas analysis test and calculation method of aeroengine

WANG Ming-rui¹, XIAO Yang², HAN Bing¹, JIA Lin-yan¹

(1. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China;

2. College of Power and Energy Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Targeting gas analysis test in the aeroengine and combustion chamber experiments, the principle and system of gas analysis test were introduced. The computing method for Liquid fuel used was optimized, and the method for gas fuel was developed. The influence of the error about gas component test on the computation result of combusting parameter was analyzed. The effects of mixed sampling means and sampler structure were discussed, and the factors about judging rationality of mixed sampler structure were provided. The measurement results of gas analysis and general testing were compared. Excess air coefficient is better than 5% with reasonable mixed sampler structure and enough measuring points and reasonable gas analysis system. The deviation of combustion efficiency from thermocouple and gas analysis is analyzed.

Key words: computing method of gas analysis; error analysis; combustor performance; gas sampler; combustion efficiency

随着航空发动机推质比的不断增加, 燃烧室的出口温度也不断提升, 目前研制的推质比为 12~15 的航空发动机机, 燃烧室出口平均温度已

达 1600℃ 以上, 热点温度超过 2000℃, 这已超出绝大多数热电偶的测试能力范围。即使有少数能测量 2000℃ 以上温度的热电偶, 由于只适用于还

原环境,在类似航空发动机燃烧室的强氧化环境中,使用寿命很短.热电偶的测量精度受使用环境影响很大,很难保证测量结果具有较高的精度^[1-2].此外,燃气轮机在工业应用领域的增加以及环保要求的日益严格,低污染物排放已成为燃气轮机燃烧室最重要的指标之一.燃气分析不但能检测燃烧室的排气污染物,而且能利用燃气成分通过计算方法获得燃烧效率、余气系数和燃烧温度等参数.燃气分析一般使用水冷取样装置,使之具备高温燃气温度的测量能力,它已经成为航空燃气涡轮发动机及燃烧室试验最重要的测试手段之一^[3-6].

本文介绍了保证燃气分析测量结果准确所应采取的测试方法、计算方法,并对测试方法所产生的误差进行了分析,并进行了试验验证.试验结果表明按文中的要求的方法可以确保足够的测量精度.

1 燃气分析测量原理及系统组成

燃气分析是利用取样装置把燃气引入测量仪表进行成分分析,再通过燃气成分数据计算燃烧效率、余气系数、燃烧温度以及污染物排放等参数的一种测量方法.燃气分析测试系统主要由取样装置、取样管路、分析仪器等部分组成.燃气分析同热电偶一样是一种“点”测试技术,为使测量数据能代表燃烧室出口截面的参数,必须布置足够的测量点,取样装置通常径向布置 5~7 个测点,并可沿周向摆动以增加测点^[7].

1.1 取样装置

取样装置是一次受感部,直接与高温燃气接触,通常采用水冷方式.取样装置将燃烧室内取样孔附近的高温燃气取出,使进入取样装置的样气快速冷却到 200℃左右,使燃气的化学反应停止而又不让燃气中的未燃碳氢成分和氮氧化物在取样装置内冷凝^[8].

取样装置按结构型式可分为混合式取样器和非混合式取样器.混合式取样器在出口设有一个混合腔,从多个取样孔进入的样气在混合腔内混合,再通过出口流出.混合式取样器的每个取样孔所代表的面积应是相等的,取样孔应位于所代表面积的形心,在进口截面为均匀流场时,应保证每个取样孔进入的样气流量相等.非混合式取样器从多个取样孔进样后,分别进行仪器分析,为方便计算,取样器的取样孔建议按照等面积布置.

1.2 取样管路

取样管路是取样装置出口到分析仪器进口的管路和附件的总称,一般由保温管路、调节阀门、无油真空泵、冷凝器、流量计以及各种接头等组成.

在测量燃气中的 NO_x 和总烃(THC)两种成分时,为防止 NO_x 和 THC 在管壁冷凝,需要对样气进行保温,建议使用电伴热管.使用红外气体分析仪测量 CO 和 CO₂ 时,为防止水蒸汽在分析仪器的气室内冷凝,应使样气在进入分析仪器前除去燃气中的水蒸汽,建议使用冷凝器使样气冷却到大约 4℃,析出绝大部分水蒸汽,随后在管路内自然升温,再进入分析仪器.当样气压力过高时,需要在管路上安装调压阀门;当样气压力低 150 kPa 时,可在管路上安装无油真空泵抽取样气.

1.3 分析仪器

根据航空燃气涡轮发动机燃烧室燃气组分以及试验目的,一般需要测量的组分有:CO₂, CO, THC 和 NO_x(NO+NO₂).通常采用红外气体分析仪测量 CO₂ 和 CO,火焰离子检测器测量 THC,化学发光分析仪测量 NO_x^[9].

标准样气是专门配置、高精度、已知体积分数的气体或气体混合物,作为分析仪器零点和标定点的基准.标定仪器零点的标准样气通常叫做零点气,用来标定仪器在量程范围内某点精度的标准样气通常叫做标点气,标点气体积分数的大小依据被测燃气的最大体积分数来确定,并用最大被测燃气体积分数的 30% 和 60% 的标点气来检查仪器的线性度.

2 计算方法

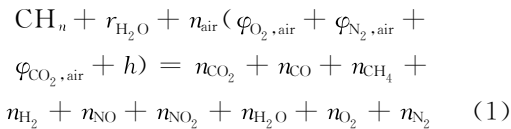
针对常用的燃气分析法燃烧效率和余气系数计算方法存在应用范围小、精度低的不足进行了改进.将航空燃气涡轮发动机的燃料种类分成液体碳氢燃料和气体燃料两种,液体碳氢燃料依据氢碳比和低热值不同,采用了 CH_n 作为名义分子式,其低热值依据化验结果作为计算的输入值;根据燃气轮机常用的气体燃料成分,在计算中假定气体燃料由 CH₄, CO, H₂, CO₂, O₂ 及 N₂ 共 6 种成分组成,每种组分的体积分数依据化验结果作为计算的输入值,此外还考虑了空气含湿量的影响.新的计算方法还适用于燃气轮机燃烧室常用的喷水降排放过程的计算.

假定燃气由 9 种气体组成,这些气体组分涵盖了燃气中体积分数较多的气体种类,可以保证

计算具有足够的精度,使得计算方法通用性更好。在实际测量时,根据燃烧室的特点,确认某种组分体积分数较低,对计算结果影响较小,可以直接对计算公式进行简化^[10-14]。

2.1 燃用液体碳氢燃料燃烧室的燃烧参数计算

液体碳氢燃料在空气中燃烧的过程化学反应方程式为^[15-17]



式中 $r_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水和液体燃料的摩尔比, n_{air} 为进入燃烧室的空气摩尔数, $\varphi_{\text{O}_2, \text{air}}$ 为空气中氧气体积分数, $\varphi_{\text{N}_2, \text{air}}$ 为空气中氮气体积分数, $\varphi_{\text{CO}_2, \text{air}}$ 为空气中二氧化碳体积分数, h 为空气的摩尔含湿量, n_i 为燃气中 i 组分的摩尔数。其中

$$\varphi_{\text{O}_2, \text{air}} + \varphi_{\text{N}_2, \text{air}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} = 1 \quad (2)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{(12.011 + 1.008n)m}{18.015} \quad (3)$$

式中 m 为燃烧室喷水与液体燃料的质量比。

1) 干湿基转换系数

燃气中含有燃烧产生的水蒸气时,各组分气体的体积分数定义为湿基体积分数;除去燃气中的水蒸气时,各组分气体的体积分数定义为干基体积分数。

$$\eta = 1 - \frac{(1 + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}})(282710\varphi_{\text{CO}} + 241595\varphi_{\text{H}_2} + 801536\varphi_{\text{CH}_4} + 90204\varphi_{\text{NO}})}{H_u(12.011 + 1.008n)(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (9)$$

式中 H_u 为每公斤燃料的发热量(单位为 kJ/kg)。

4) 排放指数计算

一氧化碳排放指数计算

$$I_{e, \text{CO}} = \frac{28007(1 + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}})\varphi_{\text{CO}}}{(12.011 + 1.008n)(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (10)$$

未燃碳氢排放指数计算

$$I_{e, \text{HC}} = \frac{16043(1 + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}})\varphi_{\text{CH}_4}}{(12.011 + 1.008n)(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (11)$$

氮氧化物排放指数计算

$$I_{e, \text{NO}} = \frac{45999(1 + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}})\varphi_{\text{NO}}}{(12.011 + 1.008n)(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (12)$$

$$I_{e, \text{NO}_x} = \frac{45999(1 + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}})\varphi_{\text{NO}_x}}{(12.011 + 1.008n)(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (13)$$

数;由于各组分气体的测试方法不同,通常情况下,THC 和 NO_x 的体积分数测量值为湿基的,CO, CO₂ 和 H₂ 的体积分数测量值为干基的。燃气分析对样气处理常用冷凝的方法,将样气冷却到 4℃,析出样气中的水分,但并不能完全除去样气中的水分。为改善精度,需要对干基体积分数进行修正。

$$\varphi_{\text{dry, cor}} = \frac{p_{\text{in}}}{p_{\text{in}} - 0.0089129} \varphi_{\text{dry}} \quad (4)$$

式中 p_{in} 为大气压力。

下面计算公式中燃气成分的体积分数省略下标“cor”,都为修正后的。干湿基转换系数 K 的定义为

$$\varphi_{\text{wet}} = K\varphi_{\text{dry}} \quad (5)$$

燃烧效率的计算公式中各组分体积分数既可统一使用干基体积分数也可统一使用湿基体积分数。

2) 余气系数计算公式

$$\alpha = \frac{0.83798n_{\text{air}}}{4 + n} \quad (6)$$

当使用湿基体积分数时

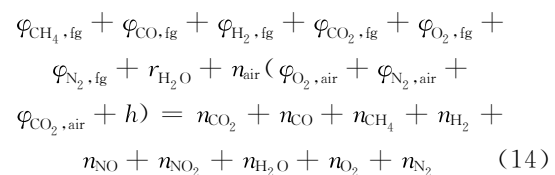
$$n_{\text{air}} = \frac{2Z_1 - n - 4r_{\text{H}_2\text{O}}}{4 + 4h - 2Z_1\varphi_{\text{CO}_2, \text{air}}} \quad (7)$$

$$Z_1 = \frac{2 - \varphi_{\text{CO}} - \varphi_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{NO}_2}}{\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4}} \quad (8)$$

3) 燃烧效率计算

2.2 燃用气体燃料燃烧室的燃烧参数计算

本节的计算方法适用于间接加温、燃用气体燃料,伴随喷水的燃烧过程,其化学反应方程式为



其中

$$\varphi_{\text{CH}_4, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO}, \text{fg}} + \varphi_{\text{H}_2, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{fg}} + \varphi_{\text{O}_2, \text{fg}} + \varphi_{\text{N}_2, \text{fg}} = 1 \quad (15)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\mu_{\text{g}} m}{18.015} \quad (16)$$

式中 μ_{g} 为气体燃料的平均分子量。

1) 余气系数计算公式

$$\alpha = \frac{0.41899n_{\text{air}}}{4\varphi_{\text{CH}_4, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO}, \text{fg}} + \varphi_{\text{H}_2, \text{fg}} - 2\varphi_{\text{O}_2, \text{fg}}} \quad (17)$$

当使用湿基体积分数时

$$n_{\text{air}} = \frac{Z_2 A - B - 2 r_{\text{H}_2\text{O}}}{2 + 2h - Z_2 \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}}} \quad (18)$$

$$Z_2 = \frac{2 - \varphi_{\text{CO}} - \varphi_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{NO}_2}}{\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4}} \quad (19)$$

式中 A 和 B 为过程常数.

2) 燃烧效率计算公式

$$\eta = 1 - \frac{(\varphi_{\text{CH}_4, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO, fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}})(282710 \varphi_{\text{CO}} + 241595 \varphi_{\text{H}_2} + 801536 \varphi_{\text{CH}_4} + 90204 \varphi_{\text{NO}})}{H_{\text{um}}(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (20)$$

式中 H_{um} 为燃料的摩尔发热量.

3) 排放指数计算

一氧化碳排放指数计算

$$I_{\text{e, CO}} = \frac{28007(\varphi_{\text{CH}_4, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO, fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}}) \varphi_{\text{CO}}}{\mu_{\text{fg}}(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (21)$$

未燃碳氢排放指数计算

$$I_{\text{e, HC}} = \frac{16043(\varphi_{\text{CH}_4, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO, fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}}) \varphi_{\text{CH}_4}}{\mu_{\text{fg}}(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (22)$$

氮氧化物排放指数计算

$$I_{\text{e, NO}} = \frac{45999(\varphi_{\text{CH}_4, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO, fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}}) \varphi_{\text{NO}}}{\mu_{\text{fg}}(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (23)$$

$$I_{\text{e, NO}_x} = \frac{45999(\varphi_{\text{CH}_4, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO, fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{fg}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{air}} n_{\text{air}}) \varphi_{\text{NO}_x}}{\mu_{\text{fg}}(\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CH}_4})} \quad (24)$$

2.3 燃烧温度的计算方法

燃气分析法燃烧温度是通过测量燃气组分体积分数计算出燃烧效率和余气系数,利用燃气平均比定压热容或焓值与温度的关系数据,计算燃烧温度.图 1 为平均定压比热法计算燃烧温度的流程.

焓值法和平均定压比热法计算燃烧温度都可以获得准确的计算结果,但由于燃气焓值的数据比较难于获得,在 0~2500 °C 范围内的燃气焓值往往是不连续的,在断点处数据容易形成振荡而不收敛;而燃气的平均比定压热容在此温度范围内是连续的,先分别计算给定温度下燃气中各组

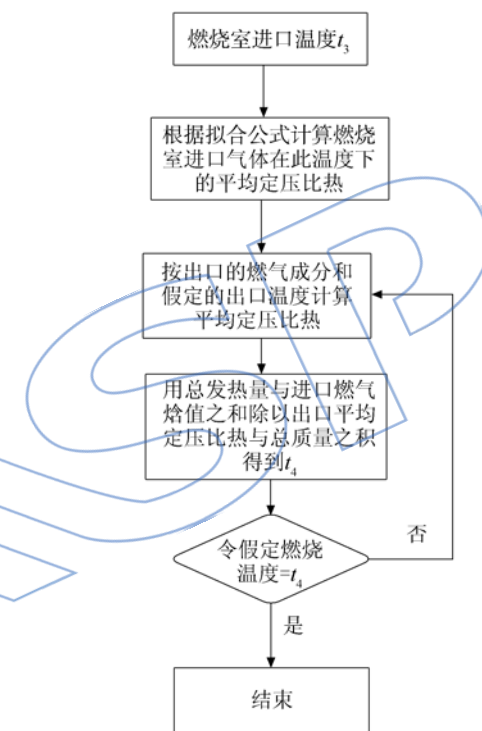


图 1 平均定压比热法计算燃烧温度流程图

Fig. 1 Procedure of computing combustion temperature with average specific heat at constant pressure

分的平均比定压热容,再按组分的体积分数加权平均,即可得到此温度下燃气的平均定压比热.当燃气温度超过 1500 °C 时,必须考虑热离解的影响.

3 误差分析

3.1 燃气组分测量精度对燃烧参数的影响

通过对燃气各组分的体积分数数据进行分析,讨论忽略某些组分对计算结果所产生的误差.当产生的误差较小时,可以不测量该组分也能满足系统控制的测量精度,从而达到简化燃气分析测试系统的目的.

1) 氢气对燃烧效率和余气系数的影响

利用式(25)和式(26)分析氢气体积分数的变化对燃烧效率和余气系数的影响。

$$\Delta\eta = \frac{0.397\Delta\varphi_{H_2}}{\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4}} \quad (25)$$

$$\Delta\alpha = \frac{0.2096\Delta\varphi_{H_2}}{\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4}} \quad (26)$$

已有的试验数据表明燃气轮机燃烧室内氢气的体积分数低于0.01%，在燃烧室的绝大部分工况下，二氧化碳的体积分数大于2.5%，因此燃烧效率变化的绝对值小于0.16%，余气系数变化的绝对值小于0.001。

2) 未燃碳氢对燃烧效率和余气系数的影响

利用式(27)和式(28)来分析未燃碳氢对燃烧效率和余气系数的影响。

$$\Delta\eta = \frac{(1.319\varphi_{CO_2} + 0.85\varphi_{CO} - 0.397\varphi_{H_2})\Delta\varphi_{CH_4}}{(\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4})^2} \quad (27)$$

$$\Delta\alpha = \frac{0.1397(0.5\varphi_{CO} + 0.5\varphi_{H_2} - 100)\Delta\varphi_{CH_4}}{(\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4})^2} \quad (28)$$

试验数据显示燃气轮机燃烧室只在慢车状态存在少量的未燃碳氢，一般少于0.005%，对燃烧效率和余气系数的影响可以忽略不计。但在燃烧室点火启动的短时间内，未燃碳氢的体积分数较大，能达到0.01%以上，是由于燃烧室部件温度比较低造成的，不是燃烧室稳定的工作状态。

3) 一氧化碳对燃烧效率和余气系数的影响

$$\Delta\eta = \frac{(0.469\varphi_{CO_2} - 0.397\varphi_{H_2} - 0.85\varphi_{CH_4})\Delta\varphi_{CO}}{(\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4})^2} \quad (29)$$

$$\Delta\alpha = \frac{0.1397(100 - 0.5\varphi_{CO_2} + 0.5\varphi_{H_2} - 0.5\varphi_{CH_4})\Delta\varphi_{CO}}{(\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4})^2} \quad (30)$$

航空发动机主燃烧室的CO体积分数一般在0.1%下，加力燃烧室的CO体积分数可能高达6%，仪器精度为1%，燃烧效率的误差小于0.2%，当燃气中CO₂体积分数大于3.7%时，余气系数的误差小于1%。

4) 二氧化碳对燃烧效率和余气系数的影响

$$\Delta\eta = \frac{(0.469\varphi_{CO} + 0.397\varphi_{H_2} + 1.319\varphi_{CH_4})\Delta\varphi_{CO_2}}{(\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4})^2} \quad (31)$$

$$\Delta\alpha = \frac{0.1397(0.5\varphi_{CO} + 0.5\varphi_{H_2} - 100)\Delta\varphi_{CO_2}}{(\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4})^2} \quad (32)$$

对于燃气轮机燃烧室的各工作状态，CO₂的体积分数在2.5%~13%之间变化，仪器精度为1%，可得出燃烧效率的误差小于0.2%，当燃气中CO₂体积分数大于3.7%时，余气系数的误差小于1%。

通过各种组分对计算结果影响的分析，可以确定：在用燃气分析法测量燃烧效率和燃烧温度时，是否检测氢气和未燃碳氢的组分体积分数对计算结果影响很小，只需测量CO和CO₂两种燃气组分的体积分数即可达到1%的系统精度。

3.2 取样方式对燃烧参数的影响

取样方式分为混合取样和非混合取样。混合取样是把取样器上所有取样孔的样气先进行混合，再进行分析的方式，只需一套分析仪器；非混合取样是每个取样孔的样气分别进入各自仪器进行分析，取样器上有多少取样孔，就需要相应套数的分析仪器。

混合取样方式引起误差的主要原因有：

- 1) 燃气轮机燃烧室出口等压力、等流速的假设偏差。
- 2) 取样孔代表面积是否满足等面积条件。
- 3) 每个取样孔到混合腔的总压力损失是否相同。

严格来说，对每个混合式样气都应进行流量测试，以确认在上游压力和流速相同的情况下，各取样孔同时进样时，每个取样孔的流量相同^[18-19]。

非混合式取样器的取样孔可以任意布置，不会产生相互之间的干扰，可以得到燃烧室出口截面的温度场分布，通过面积加权可以获得燃烧效率、余气系数和污染物排放指标，但同时需要多套仪器，这是国外发动机公司最常用的取样方法。

综上所述，在保证混合式取样器各取样孔进样量相同的情况下，燃气分析法燃烧效率的精度优于0.35%，余气系数的精度优于1.5%。对同一燃烧室出口截面数据分析表明，不同位置燃烧效率的差别要远小于余气系数的差别，是否保证混

合式取样器各取样孔进样量相同对燃气分析法燃烧效率影响较小,而对燃气分析法余气系数有较大的影响。

4 试验及结果

4.1 试验器及测试系统

试验在某全环高压燃烧室试验器进行,试验器由进气系统、排气系统、三路引气系统、冷却气系统、防护舱、水系统、燃油系统、电器系统及测试系统等组成。空气流量用流量喷嘴测量,经两级间接加热达到规定状态后进入燃烧室,燃油流量用涡轮流量计测量。在燃烧室出口的环形通道内相间布置了两只测温电偶和两只燃气取样装置,夹角为 90° ,测温电偶和燃气取样器固定于可沿燃烧室中心旋转的摆盘之上,摆盘可沿圆周方向旋转 180° 。取样器结构见图 2,每只燃气取样器沿径向布置 5 个取样孔,每个取样孔位于等环面积的中心,取样孔内径为 2 mm,进入各取样孔的样气经导管引入混合器,在混合器充分混合后,经导管通过摆盘中心腔道到试验器后部,再引出到试验器外部。摆盘以 $0.5^\circ/\text{s}$ 匀速摆动 180° ,以可实现整个截面的测量。取样器采用水冷方式,在保证取样器高温工作环境安全的前提下,可使燃气快速冷却。燃气中 CO 和 CO_2 采用红外气体分析仪测量,样气先通过冷凝器冷却到 4°C ,除水后进入红外气体分析仪;氮氧化物采用化学发光分析仪测量,样气温度保持在 65°C 左右;未燃碳氢用总碳氢分析仪测量,样气温度保持在 160°C 左右。

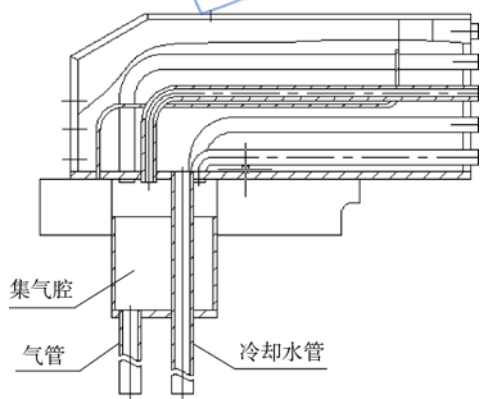


图 2 取样器结构图

Fig. 2 Structure of sampler

试验中通过测量进入燃烧室的燃油流量和空气流量计算余气系数,在燃烧室出口用电偶摆动测量燃烧室出口温度,计算出燃烧效率。燃气分析

法通过测量燃气成分计算出燃烧室的余气系数、燃烧效率和燃烧温度。试验状态见表 1。

4.2 试验结果及分析

表 2 是规定试验状态下,两种测试方法的数据对比。流量法余气系数是通过燃油流量和空气流量计算得到的,与燃气分析方法计算得到的余气系数相差小于 1% ,证实了使用图 2 所示混合式取样器、采取匀速摆动方式覆盖整个燃烧室出口截面的燃气取样所取得的样气具有很好的代表性。

电偶测量的燃烧温度比燃气分析计算的燃烧温度低 30°C 左右,使得采用温度法计算燃烧效率比燃气分析法测燃烧效率低 $3\% \sim 4\%$ 。从热电偶的测试原理来看,使用环境会影响电偶测量结果的准确性,但多次测量的结果显示在同一测试环境下,其测量结果具有较好的重复性;燃气分析是通过检测未燃成分所蕴含的热量与燃料总热量的比值,与燃烧室的环境无关,因此具有较高的测试精度和稳定性。

表 1 试验状态
Table 1 Test condition

进口空气 总温/ $^\circ\text{C}$	进口空气 总压/ kPa	进口空气流量/ (kg/s)	余气 系数
588.3	1200	23.37	2.542
588.3	500	9.792	2.433

表 2 测量结果对比
Table 2 Comparison about measuring result

测量方法	参数	状态 1	状态 2
流量法	余气系数	2.433	2.542
燃气分析		2.445	2.562
温度法	燃烧效率/ $\%$	96.19	95.26
燃气分析		99.92	99.89
电偶测量	燃烧温度/ $^\circ\text{C}$	1471.4	1428.2
燃气分析		1508.1	1456.9

5 结 论

1) 文中的计算方法在现有液体燃料的燃气分析计算方法基础上,考虑了喷水比的影响,并发展了气体燃料的燃气分析计算方法,适用范围更广。

2) 采用连续摆动燃气取样方法增加测点密度,是保证了取样代表性的有效方法。

3) 是否测量氢气和总碳氢组分对燃烧参数的计算结果影响很小,一氧化碳和二氧化碳分析仪1%的仪器精度可保证在绝大多数航空燃气涡轮发动机工作状态下,其燃烧参数的误差低于1%。

参考文献:

- [1] 张宝诚. 航空发动机试验技术和测试技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [2] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京:宇航出版社,1988.
- [3] Williamson R C, Stanforth C M. Measurement of jet engine combustion temperature by the use of thermocouples and gas analysis[J]. SAE Paper 690433,1969.
- [4] 郑必可,陈立红,林然,等. 高焓超声速气体取样分析[J]. 航空动力学报,2006,21(6):967-971.
ZHENG Bike, CHEN Lihong, LIN Ran, et al. Gas sampling and analysis in the high enthalpy flow[J]. Journal of Aerospace Power,2006,21(6):967-971. (in Chinese)
- [5] 林然,陈立红,张新宇. 直联式超燃实验台超声速燃气取样分析[J]. 实验流体力学,2006,20(1):67-71.
LIN Ran, CHEN Lihong, ZHANG Xinyu. Analysis and application of gas sampling in the direct-connect supersonic combustor testing[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2006,20(1):67-71. (in Chinese)
- [6] 钟华贵,吉洪湖,李继保. 燃气分析测量高温燃气温度的方法[J]. 航空动力学报,2005,20(3):460-466.
ZHONG Huagui, JI Honghu, LI Jibao. Methods for gas temperature measurement by gas analysis[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(3):460-466. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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, LÜ Pin, et al. Gas turbine engine emissions measurement[J]. Journal of Aerospace Power,2003,18(3):348-352. (in Chinese)
- [9] 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):35-37,2008.
WANG Mingrui, LIU Chunyu. Measurement of gaseous pollutant and smoke from an aeroengine[J]. Aeroengine,34(1):35-37. (in Chinese)
- [10] 格狄内. 燃烧过程中的气体和化学分析[R]. 北京:国防科学技术资料研究所,1963.
- [11] 范作民,吴忆峰,张洞泉. 燃气分析计算技术报告[R]. 成都:中国燃气涡轮研究院,1978.
- [12] Colket M B. Internal aerodynamics of gas sampling probes[J]. Combustion and Flame,1982,44(1/2/3):3-14.
- [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.
- [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.
- [15] 库拉金. 航空发动机及动力装置理论、计算和设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [16] 林震宇,许全宏,刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [17] 刘春宇,咎新军,王明瑞. 发动机燃烧室温度测量的探讨[R]. 成都:中国航空学会发动机试验技术专业委员会第十一届发动机试验与测试技术学会,2012.
- [18] 李锋,毕麟,彭浪清,等. 超燃冲压发动机燃烧效率取样探针设计[J]. 吉首大学学报:自然科学版,2006,27(2):43-45.
LI Feng, BI Lin, PENG Langqing, et al. The design of combustion efficiency sampling probe in scr-amjet engine[J]. Journal of Jishou University: Nature Science Edition,2006,27(2):43-45. (in Chinese)
- [19] 贾琳妍. 某国防专项课题燃气分析取样技术研究[R]. 沈阳:沈阳发动机设计研究所,2013.

(编辑:叶青)