

文章编号: 1000-8055(2005) 03-0460-07

燃气分析测量高温燃气温度的方法

钟华贵¹, 吉洪湖¹, 李继保²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500)

摘要: 叙述了两种根据燃气成分推算高温燃气温度的计算方法——效率/余气系数法和焓值守恒法。效率/余气系数法根据燃气分析得到的余气系数和燃烧效率计算燃气温度, 按燃烧效率和余气系数计算方法的不同又划分为补燃法和全成分法; 焓值守恒法根据燃气成分和焓值计算燃气温度。分析和比较了两种计算方法, 这些方法已应用到燃烧室出口高温燃气温度测量中。

关键词: 航空、航天推进系统; 燃气分析; 高温燃气; 温度测量

中图分类号: V 231. 2

文献标识码: A

Methods for Gas Temperature Measurement by Gas Analysis

ZHONG Hua-gui¹, JI Hong-hu¹, LI Ji-bao²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 100083, China;

2. China Gas Turbine Establishment, Chendu 6100500, China)

Abstract: Two computational methods, Efficiency/Air Excess Coefficient Method (EAEC) and Enthalpy Conservation Method (ECE), for gas temperature measurement based on gas components analysis were presented. The EAEC method uses air excess coefficient and combustion efficiency for gas temperature calculation. EAEC method can further be divided into reheat method and full components method. For the ECE method, the gas temperature is calculated based on gas components and their enthalpy. These methods have already been used for the gas temperature measurement at the exit of the high temperature rise combustor.

Key words: aerospace propulsion system; gas analysis; high temperature rise combustor; temperature measurement

随着发动机推重比的提高, 燃烧室出口燃气温度越来越高。推比10一级发动机燃烧室出口燃气平均温度高达1 850 K, 推比15以上级别的发动机燃烧室出口温度更高(2 000 K以上), 考虑到温度分布系数, 燃烧室出口温度已超过热电偶的测量极限, 无法利用热电偶测量燃烧室出口温度场; 而且, 当燃气温度较高时, 水冷电偶测温的换热误差较大(可达200 K)。为此, 需寻求其它方

法来测量燃烧室出口高温燃气温度。早在20世纪60年代, G. E. 公司 Williamson R C 等人就发展了一种根据燃气成分来推算燃气温度的方法, 前几年, 英国的 Bideau R J 等人进一步完善了燃气分析测温法。

本文在分析国内外燃气分析资料的基础上, 提出了两种燃气分析测温方法——效率/余气系数法和焓值守恒法。利用燃气分析测量的燃气成

分计算相应的余气系数与燃烧效率, 由燃烧效率与余气系数推算当地燃气温度, 这就是效率/余气系数法。根据燃烧效率和余气系数的不同计算方法, 效率/余气系数法包括补燃法和全成分法。焓值守恒法利用燃气成分和燃气焓值(等于反应物的焓值)计算燃气温度。本文简要描述了各种燃气分析测温计算方法的数学模型和计算公式推导过程。根据这些计算方法编制的计算机代码已成功应用于燃烧室试验中。

1 效率/余气系数法

1.1 基本假设

- (1) 燃烧室进气为未饱和空气。燃气分析适合于测量 1100℃ 以上的燃气温度, 对于燃烧室试验而言, 此时燃烧室进口气流的加热一般采用无污染加温方式;
- (2) 燃料只含 C, H, 和 N 等 4 种元素, 这满足大部分航空燃料的要求;

表 1 两种燃烧效率对比

Table 1 Comparison of two kinds of efficiency

参考文献[1] 数据		本文作者计算数据	
α	η/η_0	α	η/η_0
5	1	1.599	1.000 2
2.5	1.000 1	1.796	1
1.667	1.000 5	2.073	1
1.25	1.002 0	1.801	1.000 6
		1.664	1.001 0
		1.571	1.000 8

- (3) 燃烧室燃烧效率较高(0.98 以上), 现代

航空发动机燃烧室满足这一要求。

1.2 计算模型

根据局部燃气成分可计算得到当地的余气系数 α 和燃烧效率 η , 由余气系数计算相应的理论温升 ΔT_{th} , 则可由下式计算当地燃气的实际温度 T_g 。

$$T_g = T_a + \eta \times \Delta T_{th} \tag{1}$$

这个模型的理论基础是放热量定义的燃烧效率 η_0 (燃气分析燃烧效率) 与温升燃烧效率 η_r 相等。现代发动机主燃烧室均为短环形燃烧室, 燃烧室热损失小, 可认为这两种燃烧效率相等。文献 [1] 给出了燃烧效率接近于 1 时, 两种燃烧效率的关系。本文作者根据现代航空发动机燃烧室试验测量数据对此也进行了计算, 如表 1 所示。由此可见, 二者相差为千分之几的量级, 工程上可认为相等。

1.3 计算方法

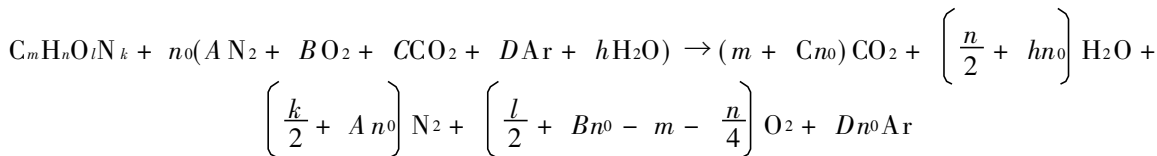
根据燃气分析仪器的配置情况, 可采用不同的方法来测量和计算余气系数与燃烧效率。如果只配置了 CO_2 和 CO 分析仪, 只能采用补燃法测量余气系数和燃烧效率。如果除以上两种仪器外, 还配置了 NO_x 分析仪和 UHC 分析仪, 则可采用全成分法计算余气系数和燃烧效率。

1.3.1 补燃法

1.3.1.1 余气系数

燃气分析补燃法的原理是: 首先测量干样气的 CO 容积浓度 r_{CO} 与 CO_2 容积浓度 r_{CO_2} , 同时测量样气补燃后的 CO_2 的容积浓度 $r_{CO_2}^t$, 则可采取如下方法计算余气系数。

补燃后的样气相当于燃料完全燃烧得到的燃气, 反应方程式为:



样气除水后水蒸气的摩尔数为 n_{H_2O} , 摩尔浓度为 r_{H_2O} , 则以下两式成立。

$$\frac{n_{H_2O}}{(m + C n_0) + \left(\frac{l}{2} - m - \frac{n}{4} + B n_0\right) + \left(\frac{k}{2} + A n_0\right) n_{H_2O} + D n_0} = r_{H_2O} \tag{2}$$

$$\frac{m + C n_0}{(m + C n_0) + \left(\frac{l}{2} - m - \frac{n}{4} + B n_0\right) + \left(\frac{k}{2} + A n_0\right) n_{H_2O} + D n_0} = r_{CO_2}^t \tag{3}$$

$$n_0 = \frac{(1 - r_{\text{H}_2\text{O}})m + \left[\frac{n}{4} - \frac{k+l}{2} \right] r_{\text{CO}_2}^T}{r_{\text{CO}_2}^T + C(r_{\text{H}_2\text{O}} - 1)} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{(1 - r_{\text{H}_2\text{O}})m + \left[\frac{n}{4} - \frac{k+l}{2} \right] r_{\text{CO}_2}^T}{r_{\text{CO}_2}^T + C(r_{\text{H}_2\text{O}} - 1)} \times \frac{B}{m + \frac{n}{4} - \frac{l}{2}} \quad (5)$$

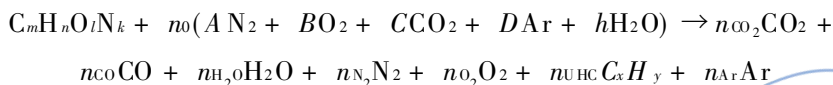
如果燃料成分为 C_mH_{2n} , 且忽略干燥样气中的水分, 则:

$$\alpha = \beta \times \frac{\frac{2}{3} + \frac{1}{3} r_{\text{CO}_2}^T}{r_{\text{CO}_2}^T - C} = \frac{0.1397}{r_{\text{CO}_2}^T - C} + 0.0698 \quad (6)$$

这与参考文献[2]给出的余气系数的计算公式相同。

1.3.1.2 燃烧效率

与计算余气系数一样, 忽略 NO_x 的影响, 则燃烧反应方程式如下:



设:

$$N = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{UHC}} + n_{\text{Ar}}$$

则根据各种元素的质量守恒定律可计算得到:

$$N = \frac{\frac{n}{4} + \frac{k+l}{2} + (1+h)n_0 - \left[\frac{y}{4x} - \frac{1}{x} \right] (m + Cn_0)}{1 - \left[\left[\frac{y}{4x} - \frac{1}{x} \right] r_{\text{CO}_2} + \left[0.5 + \frac{y}{4x} - \frac{1}{x} \right] r_{\text{CO}}} \quad (7)$$

其中: n_0 由(4)式计算。

如果把未燃烧氢均当作 CH_4 , 燃料成分为 C_mH_n , 则:

$$N = \frac{(n/4) + (1+h)n_0}{1 - 0.5r_{\text{CO}}} \quad (8)$$

由此, 可计算得到未燃烧碳氢的摩尔数 n_{UHC} :

$$n_{\text{UHC}} = \frac{m + Cn_0 - Nr_{\text{CO}_2} - Nr_{\text{CO}}}{x} \quad (9)$$

则可由下式计算燃烧效率:

$$\eta = 1 - \frac{Nr_{\text{CO}}Q_{\text{CO}} + n_{\text{UHC}}Q_{\text{UHC}}}{\mu_f H_{uf}} \quad (10)$$

其中:

$$Q_{\text{CO}} = 282\,993.2 \text{ J/mol}, \quad Q_{\text{UHC}} = Q_{\text{CH}_4} = 802\,302.9 \text{ J/mol}, \quad H_{uf} = 43\,500 \text{ J/g}$$

分别指 CO 和 UHC 与燃料的热值。

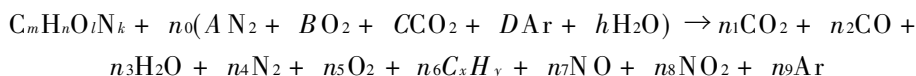
对于 C_mH_{2m} 类燃料(航空煤油可认为属此类燃料), 参考文献[2]给出的燃烧效率的计算公式为:

$$\eta = \frac{[\text{CO}_2] + 0.531[\text{CO}]}{[\text{CO}_2^T]} \quad (11)$$

经过计算对比, 上述两种补燃法计算燃烧效率的差别可忽略不计。

1.3.2 成分法

忽略燃气成分的化学解离, 燃烧产物的主要成分为 CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , NO , NO_2 , CO , UHC , Ar 等, 则反应方程式如下:



根据碳、氢、氧、氮、氯元素的守恒关系式和测量的 CO_2 , NO , NO_2 , CO , UHC 的容积浓度可得到 11 个方程, 联解这些方程组可得:

$$\frac{n_0}{m} = \frac{2z - [(n + 2k + 2l)/m]}{4(1 + h - 0.5zC)}$$

(12)

其中:

$$z = 2 \times \frac{1 + 0.5r_{NO_2} - 0.5r_{CO} + \left(\frac{1}{x} - \frac{y}{4x}\right)r_{UHC}}{r_{CO_2} + r_{CO} + r_{UHC}}$$

(13)

根据余气系数的定义有:

$$\alpha = \frac{n_0B}{m + 0.25n - 0.5l} = \frac{n_0}{m} \times \frac{B}{1 + 0.25\frac{n}{m} - 0.5\frac{l}{m}}$$

(14)

根据上述关系可得:

$$\eta = 1 - \frac{H_{uCO}EI_{CO}}{1\,000H_{uf}} - \frac{H_{uUHC}EI_{UHC}}{1\,000H_{uf}}$$

(15)

其中:

$$EI_{CO} = \frac{1\,000\mu_{CORCO}\left(1 + C\frac{n_0}{m}\right)}{\left[\mu_C + \mu_H\frac{n}{m}\mu_O\frac{l}{m} + \mu_N\frac{k}{m}\right](r_{CO_2} + r_{CO} + r_{UHC})}$$

(16)

$$EI_{UHC} = \frac{1\,000\mu_{UHC}r_{UHC}\left(1 + C\frac{n_0}{m}\right)\frac{1}{x}}{\left[\mu_C + \mu_H\frac{n}{m}\mu_O\frac{l}{m} + \mu_N\frac{k}{m}\right](r_{CO_2} + r_{CO} + r_{UHC})}$$

(17)

余气系数与燃烧效率的计算公式与对俄合作行冷却、除水和干燥后,再测量干样气中CO₂和CO的含量,即这两种成分采用干基测量方法。因此,需将CO₂和CO的干基含量转换为湿基含量。

上述计算以湿燃气中的CO₂,CO,UHC,NO,NO₂的含量(即湿基含量)为基础,而在实际的燃烧室试验中,为避免水分的影响,往往需对样气进行干湿基浓度转换系数为:

$$K = \frac{\left\{ \left[4 + C\frac{n - 2k - 2l}{m} + \left(C\frac{n}{m} - 2h \right) (r_{NO_2} + a) + \left[\frac{y}{2} \left(4 + 4h - C\frac{n + 2k + 2l}{m} \right) - (2 + h)\frac{n}{m} + h\frac{2k + 2l}{m} \right] r_{UHC} \right] \right\} (1 + h_x)}{\left\{ 4 + 4h - C\frac{n + 2k + 2l}{m} + \left[(2 + h)\frac{n}{m} - 2h\frac{k + l}{m} \right] \cdot (1 + h_x)(r_{CO_2,d} + r_{CO,d}) + \left(C\frac{n}{m} - 2h \right) (1 + h_x)r_{CO,d} \right\}}$$

(18)

其中:

$$a = \left(\frac{2}{x} - \frac{y}{2x} \right) r_{UHC}$$

当将UHC当作CH₄看待时,K的计算公式与对俄合作获得的公式相同。当NO_x干基测量(红外测量法)时,经过一系列的推导,可得到干湿基浓度转换系数为:

$$K = \frac{\left\{ \left[4 + C\frac{n - 2k - 2l}{m} + \left(c\frac{n}{m} - 2h \right) a + \left[\frac{y}{2} \left(4 + 4h - C\frac{n + 2k + 2l}{m} \right) - (2 + h)\frac{n}{m} + h\frac{2k + 2l}{m} \right] r_{UHC} \right] \right\} (1 + h_x)}{\left\{ 4 + 4h - C\frac{n + 2k + 2l}{m} + \left[(2 + h)\frac{n}{m} - 2h\frac{k + l}{m} \right] (1 + h_x) \cdot (r_{CO_2,d} + r_{CO,d}) + \left(C\frac{n}{m} - 2h \right) (1 + h_x)(r_{CO_2} + r_{CO}) \right\}}$$

(19)

表2 两种方法测量的余气系数与燃烧效率对比

Table 2 Comparison of air excess coefficient and combustion efficiency measured by two methods

测点	补燃法		成分法		相对偏差	
	α	η	α	η	$\alpha/\%$	$\eta/\%$
1	1.789	0.988 6	1.801	0.997 2	- 0.7	- 0.9
2	1.672	0.999 8	1.664	0.996 0	0.5	0.4
3	1.560	0.990 0	1.566	0.996 0	- 0.4	- 0.6
4	1.577	0.998 6	1.571	0.996 1	0.4	0.3
5	1.779	0.989 1	1.788	0.996 2	- 0.5	- 0.7

1.3.3 补燃法与成分法测量的余气系数与燃烧效率的对比

从燃烧效率的计算公式(11)和(15)中可以看出,燃气成分的测量不确定度对燃烧效率计算的影响大不相同。在补燃法中,CO₂浓度测量不确定度对燃烧效率的影响放大了近1.5倍,当燃烧室燃烧效率较高时,常会出现测量燃烧效率大于1的情况;对成分法而言,CO与UHC浓度的测量不确定度对燃烧效率的影响可忽略不计,测量的燃烧效率永远小于1。

由余气系数的计算公式(6)和(14)可知,不管采取哪种方法,CO₂含量是影响余气系数计算的决定性因素,当燃烧效率高时尤其如此,余气系数的不确定度与CO₂浓度的测量不确定度基本上成

$$C_mH_nO_lN_k + n_0(A N_2 + B O_2 + C CO_2 + D Ar + h H_2O) \rightarrow n_1CO_2 + n_2CO + n_3H_2O + n_4N_2 + n_5O_2 + n_6C_xH_y + n_7NO + n_8NO_2 + n_9Ar$$

现代发动机燃烧室均采用短环形结构,燃烧室长度短,散热损失小,可认为燃烧室为定压绝热燃烧系统,因此,燃气的焓值等于燃料的焓值和燃烧空气的焓值之和,对于1摩尔燃料而言,有:

$$H_f + n_0(H_a + h \cdot H_{H_2O}) = \sum_i^9 n_i H_i \quad (20)$$

其中: n_i 为1摩尔燃料燃烧得到的各燃气成分的摩尔数。

2.2 计算方法

根据1.3.2节的计算方法,可得到CO₂, H₂O, N₂, O₂, NO, NO₂, CO, UHC, Ar等燃气成分的摩尔数和参加燃烧的干空气的摩尔数 n_0 。根据参考文献[1, 3],燃气各种组分的焓值可拟合为温度的多项式函数。因而燃气的焓值实际上也是温度的多项式函数,因此,利用焓值守恒方程,采用迭代法即

正比关系。采用补燃法与成分法得到的余气系数的不确定度相当。

在某燃烧室试验中,采用两种方法来测量余气系数和燃烧效率,表2列出了其中一支采样耙的5个采样管获得的燃烧效率和余气系数。补燃法得到的燃烧效率较分散,由此可证明补燃法测量的燃烧效率不确定度大。

2 焓值守恒法

2.1 计算模型

同样,忽略燃气成分的化学解离,燃烧产物的主要成分为CO₂, H₂O, N₂, O₂, NO, NO₂, CO, UHC, Ar等,则燃烧反应方程式如下:

可得到燃气温度 T_g 。

3 燃气分析系统

为了测量高温升燃烧室的燃烧效率和燃烧室出口的燃气温度,我们建立了一套燃气分析系统。该系统是在线系统,可实时测量燃气成分,同时计算得到燃烧效率、余气系数和燃气温度。系统主要由采样、样气处理、补燃控制与气体分析仪等组成。通过调节采样耙冷却水量与样气流量,保证采样耙出口的样气温度为(150±30℃)。样气经保温管进入燃气分析控制柜,保温管由电阻丝加热,壁温控制在(160±5℃)之间。样气处理包括降温、除水与干燥等过程,其目的是去除样气中的水蒸气,符合不分光式CO₂和CO分析仪测量要求。采用补燃法时,样气分为两路,一路经过补燃炉补燃后

进行样气处理, 另一路不经过补燃直接进行样气处理。处理完的两路样气分别进入不分光式 CO₂ 分析仪测量补燃前后的 CO 和 CO₂ 浓度。其流程如图 1 所示。

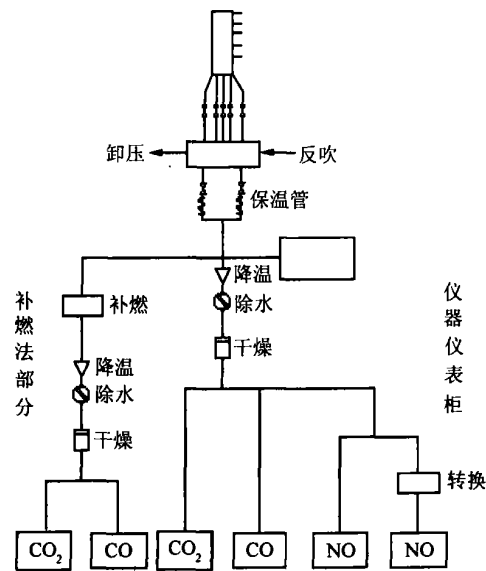


图1 燃气分析系统流程

Fig. 1 Flow chart of gas analysis system

采用成分法时, 保温后的样气直接进入氢火焰离子探测器 FIDMAT 5E, 湿基测量样气中的 UHC。另外一路样气经上述方法除水后分别进入 CO₂, CO, NO 分析仪, NO₂ 转换为 NO 再进行测量。CO₂, CO, NO 分析仪均采用不分光式红外分析仪。

该燃气分析系统设置了仪器实时校准装置, 一旦发现气体分析仪出现问题, 即可对仪器进行校准。系统还设置了反吹装置, 当燃烧室熄火与点火时, 打开反吹阀反吹采样管线, 避免液态油进入采样管引起测量误差。

4 试验结果分析

在某试验器二级加温器出口, 安装一支装有

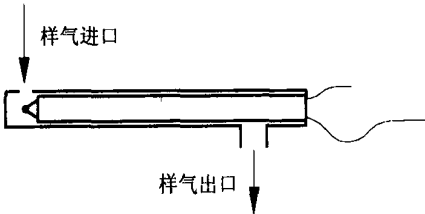


图2 复合采样装置示意图

Fig. 2 Sketch of compound sampling device

测温电偶的复合采样装置(见图2)。复合耙可径向移动。同时采用燃气分析补燃法与热电偶测量燃气温度, 试验结果如图 3 所示, 电偶与燃气分析测量的温度场的趋势相同。由于电偶在测量高温燃气温度时存在较大的辐射误差, 因此, 在测量截面的中心高温区, 电偶测量温度低于燃气分析测量温度。

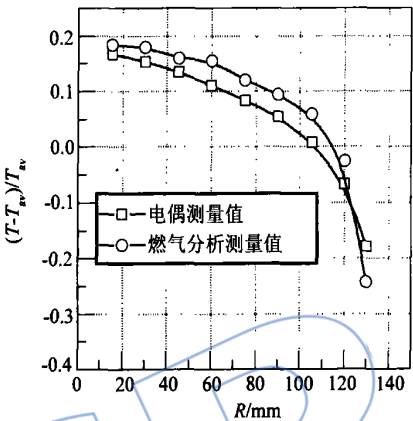


图3 电偶与燃气分析测温对比

Fig. 3 Comparison of gas temperature measured by a thermocouple and gas analysis

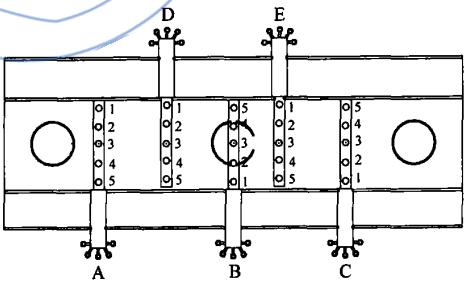


图4 出口采样耙分布

Fig. 4 Arrangement of sampling rake at combustor exit

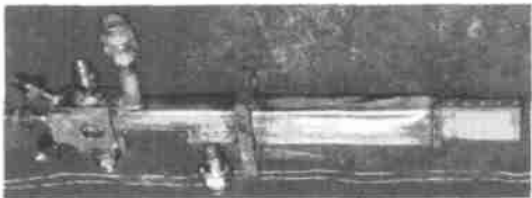


图5 5点采样耙

Fig. 5 Sampling rake with 5 tubes

某三头部燃烧室试验中, 燃烧室出口安装 5 支 5 点采样耙, 如图 4 和图 5 所示。利用燃气分析系统测量燃烧室出口 25 个测点的样气成分(同时

表 3 3 种计算方法计算的温度数据
Table 3 Temperature calculated by three methods

测点	全成分法		焓值守恒法	效率/ 余气系数法	
	α	η	T_{en}, K	$T_{EA, C}, K$	T_{RE_C}, K
1	1. 801	0. 997 2	1 804. 7	1 803. 2	1 800. 2
2	1. 664	0. 996 0	1 886. 6	1 883. 7	1 881. 0
3	1. 566	0. 996 0	1 952. 8	1 950. 5	1 949. 1
4	1. 571	0. 996 1	1 949. 8	1 947. 1	1 945. 4
5	1. 788	0. 996 2	1 810. 9	1 808. 8	1 807. 0

$T_{EA,C}$: 效率/ 余气系数成分法计算的燃气温度
 T_{RE_C} : 效率/ 余气系数补燃法计算的燃气温度

测量补燃后的CO₂ 浓度), 并采用3 种方法计算测点处燃气温度, 其中一支采样耙(E# 耙) 得到的数据如表2 所示。5 支采样耙测量的出口温度分布如图6 所示。焓值守恒法计算的燃气温度普



图6 燃气分析测量的某三头部燃烧室出口温度分布

Fig. 6 Three-atomizer combustor outlet temperature Profile measured by gas analysis

遍比效率/ 余气系数成分法计算的温度高 2℃ 左右, 与效率/ 余气系数补燃法计算的的温度差别在 5℃ 以内, 3 种计算方法得到的结果基本一致。燃气分析测量的燃烧室出口温度分布反映了真实情况。

5 结 论

本文介绍了 3 种利用燃气分析测量的燃气成

分来推算高温燃气温度的方法, 这些方法已应用于燃烧室出口燃气温度的测量中。从实际使用情况来看, 3 种方法均能满足燃烧室出口高温燃气温度测量的需要, 但各有利弊, 主要表现在:

- (1) 补燃法使用仪器少, 计算方法简单, 便于试验数据的实时显示, 但测量不确定度较大。
- (2) 成分法需仪器多, 尤其需配置昂贵的 UHC 分析仪。
- (3) 效率/ 余气系数成分法计算方法简单, 焓值守恒法计算方法较复杂, 在计算中存在迭代过程。
- (4) 3 种方法中焓值守恒法更为合理, 温度数据的测量不确定度更小。

参考文献:

[1] 范作民, 傅翼权. 热力过程计算与燃气表(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
[2] 范作民, 吴忆峰, 张洞泉. 燃气分析计算技术报告[R]. 四川成都: 中国燃气涡轮研究院, 1978.
[3] Irvin Glassman, Combustion[M]. 3rd Edition, ACADEMIC PRESS, California, 1996.