

基于成分的燃烧室出口燃气温度计算方法

韩冰, 王明瑞, 李亚娟, 马征

(中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对燃烧室不同温度下燃气组成的不同, 提出建立不同燃气模型以推算燃气温度的两种计算方法。基于物质守恒、化学平衡和能量守恒原理建立温度计算方程, 根据能量守恒方程的不同表达形式给出平均比定压热容法和焓值法, 同时给出两种求解非线性方程组的数学解法: 三变量迭代法和牛顿法, 并采用 VB (Visual Basic) 编制燃气分析测试程序实现温度算法。列举计算实例比较两种算法的区别, 结果显示: 随着油气比的增加, 两种计算方法得到的燃气温度相差越大, 考虑热离解的高温算法结果更小, 原因在于燃气中离解组分的摩尔分数随着温度升高而增加, 燃烧实际放热量减小, 导致燃气温度减小, 所以当燃气温度较高时建议采用高温算法更符合实际燃烧情况。

关 键 词: 燃气模型; 燃气温度; 能量守恒方程; 非线性方程组; 三变量迭代法; 牛顿法

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Calculation method for gas temperature from combustor outlet based on gas composition

HAN Bing, WANG Mingrui, LI Yajuan, MA Zheng

(Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: According to different gas compositions in combustor at different temperatures, two calculation methods for predicting gas temperature by establishing different gas models were proposed. Based on the theory of substance conservation, chemical equilibrium and energy conservation, the equations of temperature calculation were established. According to different expressions of the energy conservation equation, the average specific heat capacity of constant pressure method and the enthalpy value method were given, two mathematical methods for solving nonlinear equations were presented at the same time, including three variables iterative method and Newton method. VB (Visual Basic) was used to compile test program to realize temperature algorithm. The calculation example was enumerated to compare the difference between the two algorithms. The result shows that the difference of gas temperatures obtained by the two methods is greater with the increase of oil gas ratio, the result acquired by the high temperature algorithm considering thermal dissociation is smaller, and the reason is that the molar fraction of the dissociated components in the gas increases with the temperature rise, and the actual heat release decreases, leading to the decrease in gas temperature. Therefore when the gas temperature is higher, the high temperature algorithm is more in line with the actual combustion situation.

收稿日期: 2017-06-03

作者简介: 韩冰(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事航空发动机燃烧室燃气分析测试技术。E-mail: 303795845@qq.com

引用格式: 韩冰, 王明瑞, 李亚娟, 等. 基于成分的燃烧室出口燃气温度计算方法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(11): 2687-2693. HAN Bing, WANG Mingrui, LI Yajuan, et al. Calculation method for gas temperature from combustor outlet based on gas composition[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(11): 2687-2693.

Key words: gas model; gas temperature; energy conservation equation; nonlinear equations; three variables iterative method; Newton method

随着航空发动机的推质比持续增加,燃烧室的出口温度不断提高,高温升主燃烧室在设计点的油气比可达到 0.037,出口平均温度已经超过 1600℃,热点温度超过 2000℃,这已超出常规铂铑系列热电偶的测温范围,少数能测高温的热电偶在航空发动机燃烧室这种强氧化环境内的使用寿命很短,误差较大,工程应用有待进一步研究^[1]。燃气分析法作为一种间接测温方法,通过分析测量燃烧室出口的燃气成分来推算燃烧室的出口温度,具有工程实用性强、测温范围宽、测温精度高等优点,是一种将热力学知识、数值求解技术和程序设计三种内容结合的工程测试技术^[2]。

20 世纪 70 年代初,GE 公司开始探索用燃气分析方法测量燃烧室出口燃气温度;80 年代美国 NASA 刘易斯研究中心对燃气分析进行深入研究,建立了分析计算程序,在 80 年代中后期 NASA 发表的 NNEPEQ 程序开始考虑化学平衡效应;90 年代英国研究了采用成分推算燃气温度的方法,考虑了高温离解问题,分析各种因素对测量的影响,编制计算程序,提高燃气分析测温精度。国外标准 SAE ARP1533 详细介绍了根据测得的燃气成分推算油气比和燃烧效率的计算公式,而燃气温度的计算方法目前没有相关的标准进行具体规定,可查阅的国外文献也有限,国内公开发表的文章关于燃气温度的计算方法也各自不同且不全面^[3-4]。

本文详细介绍了针对不同的温度范围,建立对应的燃气模型推算燃气温度,给出了两种数学解法求解非线性方程组,利用 VB 编程实现温度算法并应用在燃烧室的出口温度测试中。

1 测温原理

现代航空发动机燃烧室被看作是一个绝热等压系统,在给定反应混合物及初始温度的条件下,如果确定了燃烧室出口燃气的各组分摩尔分数,就可以利用热力学第一定律即能量守恒定律计算出燃气温度^[5-6]。

燃烧室内不同空间的油气比不同,产生不同的燃气组分,达到不同的燃烧温度,通过测量局部区域的燃气组分推算相应的燃烧温度,进而得到燃烧室出口截面的温度分布,该方法的成立是建立在燃烧室内空间组分的组分场和温度场保持一

致,热量和组分在空间的传递速率相同这一假设上,即不同气流微团之间的热量交换主要依靠传质进行^[7]。实际上燃烧室局部空间的组分场和温度场是不对应的,但是文献[7]将燃气分析与热电偶的测温结果进行对比,认为该因素对燃气分析的测温影响可以忽略。

通常碳氢燃料与空气完全燃烧生成的产物是 CO₂、H₂O、O₂、N₂,但是在实际燃烧过程中,燃烧产物的组成并不是简单的理想混合物,因此建立的燃气成分模型是否具有代表性关系到计算燃气温度的精度。当燃气温度不太高时,燃气中不完全燃烧的组分如 CO 和 UHC(未燃尽碳氢化合物)的摩尔分数较高,燃气热离解影响很弱可以忽略不计,由此假定低温燃气由 10 种气体组分 CO₂、CO、H₂O、NO、NO₂、UHC、O₂、N₂、H₂、Ar 组成^[8-9];随着燃气温度不断升高,不完全燃烧成分的摩尔分数逐渐减少,燃烧的主要成分会发生离解反应,产生许多离解成分而且离解成分之间也会发生化学反应,假设系统处于化学平衡状态,由此假定高温燃气由 12 种气体组分 CO₂、CO、H₂O、Ar、O₂、N₂、H₂、NO、OH、H、O、N 组成^[10-12],离解组分只能在热态情况下存在,离解组分进入取样器经“冻结”后会发生“复合”反应,只能通过理论计算得到。

在确定好燃气模型后,需要建立燃烧室燃烧过程的能量平衡关系,如式(1)所示^[13]:

$$H_g = Q_f + H_f + H_a - Q_u - Q_d - Q_t - W \quad (1)$$

式中 H_g 为燃烧室出口燃气焐值; Q_f 为燃料低热值; H_f 、 H_a 分别为燃烧室进口燃料和空气的初焐; Q_u 为燃料未完全燃烧热损失; Q_d 为离解热损失; Q_t 为向外界传热损失; W 为燃气所做膨胀功以外的外功,一般情况下 Q_t 和 W 被看作是零。

能量守恒方程的表达形式一般可分为两类:平均比定压热容法和焐值法。

1.1 平均比定压热容法

碳氢燃料与空气燃烧系统化学平衡状态燃气成分和燃气热力性质计算所用到的基本假设是认为混合气体(在成分不变的条件下)及其中每一种气体组分都是理想气体。燃烧室系统压力损失比较小,近似看成等压系统,可以采用气体的平均比

定压热容计算气体的焓值。

根据参考文献[14]给出的常用气体在完全气体状态下的平均比定压热容数据,可以拟合出这些气体的平均比定压热容与温度的多项关系式。经测量及计算得到燃气中各成分的摩尔分数,由拟合的多项关系式计算各组分在给定温度下的平均比定压热容,进而可计算燃气混合物在给定温度下的平均比定压热容。

由于文献[14]给出的是各气体从 0°C 到任意温度 t 的平均比定压热容数据,而燃料低热值的测定温度一般是 25°C ,为了准确计算需统一参考温度,因此规定采用平均比定压热容计算气体焓值也以 25°C 作为基准。利用平均比定压热容表示的能量守恒方程如下:

$$c_{p,a} \Big|_0^{t_3} \cdot t_3 - c_{p,a} \Big|_0^{25} \cdot 25 + \eta f Q_f = c_{p,g} \Big|_0^{t_4} \cdot (1+f)t_4 - c_{p,g} \Big|_0^{25} \cdot (1+f) \cdot 25 \quad (2)$$

式中 $c_{p,a} \Big|_0^{t_3}$ 表示进口空气在 $0 \sim t_3$ 的平均比定压热容; t_3 表示进口空气的温度; $c_{p,a} \Big|_0^{25}$ 表示进口空气在 $0 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 的平均比定压热容; η 表示燃烧室的燃烧效率; f 表示燃烧室的油气比; $c_{p,g} \Big|_0^{t_4}$ 表示出口燃气在 $0 \sim t_4$ 的平均比定压热容; t_4 表示出口燃气的温度; $c_{p,g} \Big|_0^{25}$ 表示出口燃气在 $0 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 的平均比定压热容。

1.2 焓值法

利用焓值法表示能量守恒方程有两种方法:第一种是根据燃气模型中设定好的燃烧产物的组成,将燃烧室出口燃气的焓值由燃气中各组分的焓值按组分摩尔分数加权相加表示,能量守恒方程如式(3)所示。

$$n_a H_a + M_f Q_f \eta = n_g \sum (x_{g,i} H_{g,i}) \quad (3)$$

式中 n_a 表示参与燃烧室燃烧的实际空气物质的量; M_f 表示燃料的摩尔质量; n_g 表示燃气物质的量; $x_{g,i}$ 表示燃烧室出口燃气中各气体组分 i 的摩尔分数; $H_{g,i}$ 表示燃烧室出口燃气中各气体组分 i 在对应温度下的焓值,各气体组分在不同温度下的焓值可在文献[15]中查到。式(3)的表达与式(2)的平均比定压热容法类似,都是先已知燃气的组成,然后计算燃气的焓值。

第二种是根据所列的能量守恒方程(式(4))计算出燃烧室出口燃气焓值,利用现有的燃气焓值表得到对应的温度。

$$H_g = \frac{H_a + f\eta Q_f}{1+f} \quad (4)$$

当采用第二种焓值法计算燃气温度时有以下

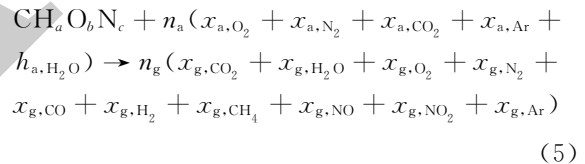
两个缺点:①文献[16]给出的燃气焓值表只适用于当量比小于 1 的范围,文献[17]虽然包括了当量比大于 1 的范围,但是焓值表给出的是指定压力和油气比下燃气焓值与温度的对应关系,如果实际试验状态中的压力和油气比不是焓值表指定的数值,就需要插值计算,这样处理是比较繁琐的;②目前参考的焓值表都是氢碳比为 2 的碳氢燃料与空气系统的热力性质表,且燃料都是液态燃料。对于氢碳比不为 2 的燃料,即使给出了建立焓值表的计算方法,但是重新建立一个燃气焓值表,不但计算量大,而且同样存在插值计算的问题。至于燃料是气态的情况,还没有相应的燃气焓值表可以参考。

综上考虑第二种焓值法的通用性不好,不建议采用,而平均比定压热容法和第一种焓值法是基于燃气组成已知的前提下计算燃烧室出口燃气焓值从而建立能量守恒方程,适用性很好。

2 计算方法

2.1 低温计算方法

低温计算方法所采用的燃烧化学反应方程式如式(5)所示,表达式 $\text{CH}_a\text{O}_b\text{N}_c$ 代表液体燃料或者气体燃料。



式中下标 a, b, c 分别表示燃料中所含的 H、O、N 原子数; x_{a,O_2} 、 x_{a,N_2} 、 x_{a,CO_2} 、 $x_{a,\text{Ar}}$ 分别表示空气中的 O_2 、 N_2 、 CO_2 、Ar 的摩尔分数; $h_{a,\text{H}_2\text{O}}$ 表示空气中的摩尔含湿量。根据元素守恒可以建立如下方程式:

C 平衡

$$(x_{g,\text{CO}_2} + x_{g,\text{CO}} + x_{g,\text{CH}_4})n_g = 1 + n_a x_{a,\text{CO}_2} \quad (6)$$

H 平衡

$$(2x_{g,\text{H}_2\text{O}} + 2x_{g,\text{H}_2} + 4x_{g,\text{CH}_4})n_g = a + 2n_a h_{a,\text{H}_2\text{O}} \quad (7)$$

O 平衡

$$(2x_{g,\text{CO}_2} + x_{g,\text{H}_2\text{O}} + 2x_{g,\text{O}_2} + x_{g,\text{CO}} + x_{g,\text{NO}} + 2x_{g,\text{NO}_2})n_g = b + n_a(2x_{a,\text{O}_2} + 2x_{a,\text{CO}_2} + h_{a,\text{H}_2\text{O}}) \quad (8)$$

N 平衡

$$(2x_{g,\text{N}_2} + x_{g,\text{NO}} + x_{g,\text{NO}_2})n_g = c + 2n_a x_{a,\text{N}_2} \quad (9)$$

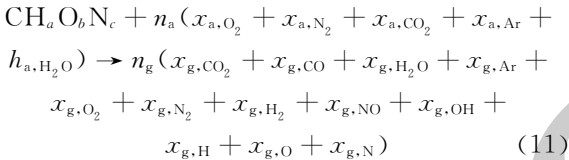
Ar 平衡

$$n_g x_{g,Ar} = n_a x_{a,Ar} \tag{10}$$

燃气分析测试仪器可测得 CO_2 、 CO 、 NO_x (NO 和 NO_2)、 UHC 和 H_2 的摩尔分数,其他组分以及 n_a 、 n_g 共 6 个未知量通过物质守恒方程式(6)~式(10)和方程 $\sum x_{g,i} = 1$ 即可计算得到,进而计算出油气比和燃烧效率,最后按照式(2)列出能量守恒方程计算燃气温度,在求解温度时只需迭代一个能量守恒方程即可。

2.2 高温计算方法

高温计算方法假设燃烧处于化学平衡状态,因此该方法计算得到的温度也叫绝热平衡温度,所采用的燃烧化学反应方程式如式(11)所示:



C 平衡

$$\frac{p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}}{p} n_g = 1 + n_a x_{a,\text{CO}_2} \tag{12}$$

H 平衡

$$\frac{2p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{H}_2} + p_{\text{OH}} + p_{\text{H}}}{p} n_g = a + 2n_a h_{a,\text{H}_2\text{O}} \tag{13}$$

O 平衡

$$\frac{2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{O}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}} + p_{\text{O}}}{p} n_g = b + n_a(2x_{a,\text{O}_2} + 2x_{a,\text{CO}_2} + h_{a,\text{H}_2\text{O}}) \tag{14}$$

N 平衡

$$\frac{2p_{\text{N}_2} + p_{\text{NO}} + p_{\text{N}}}{p} n_g = c + 2n_a x_{a,\text{N}_2} \tag{15}$$

Ar 平衡

$$\frac{p_{\text{Ar}}}{p} n_g = n_a x_{a,\text{Ar}} \tag{16}$$

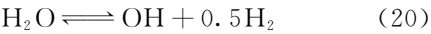
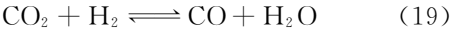
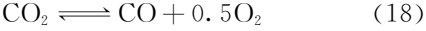
压力方程

$$\sum p_i = p \tag{17}$$

式中 p_i 为燃烧室出口燃气中各气体的分压, p 为燃烧室的工作压力。

燃烧室出口的燃气在经取样器冷却冻结后,由测量冷却后的燃气组分计算得到的油气比应该与该位置处的热态燃气所代表的油气比是一致的,因此 n_a 可通过冻结后测得的气体组分计算得到。

给出 7 个独立的化学反应方程式。



从热力学角度来看,计算燃气化学平衡成分有两类典型方法,即平衡常数法和最小吉布斯自由能法,两者的主要区别在于,前者应用了化学反应的解离方程,后者应用了定温定压反应系统达到平衡状态时其自由能为最小值的条件。本文介绍的计算方法为平衡常数法,用该方法计算燃烧产物组分时,需要把吉布斯自由能与反应系统中物质的摩尔分数联系起来,而物质的摩尔分数常用分压力表示。对以上 7 个化学反应过程列出相应的解离方程如下所示:

$$K_{p1} = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}} \left(\frac{p_{\text{O}_2}}{p} \right)^{0.5} \tag{25}$$

$$K_{p2} = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}} \tag{26}$$

$$K_{p3} = \frac{p_{\text{OH}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{p_{\text{H}_2}}{p} \right)^{0.5} \tag{27}$$

$$K_{p4} = \frac{(p_{\text{NO}})^2}{p_{\text{N}_2} p_{\text{O}_2}} \tag{28}$$

$$K_{p5} = \frac{(p_{\text{H}})^2}{p_{\text{H}_2} p} \tag{29}$$

$$K_{p6} = \frac{(p_{\text{O}})^2}{p_{\text{O}_2} p} \tag{30}$$

$$K_{p7} = \frac{(p_{\text{N}})^2}{p_{\text{N}_2} p} \tag{31}$$

其中 p° 表示标准状态大气压力, K_{p_i} 为按气体分压计算的相应化学反应的平衡常数,按式(32)计算

$$K_p = \exp\left(\frac{\Delta S_{t_4}^\circ}{R_u} - \frac{\Delta H_{t_4}^\circ}{R_u t_4}\right) \tag{32}$$

式中 R_u 表示摩尔气体常数,取值为 $8.314\,298\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $\Delta S_{t_4}^\circ$ 、 $\Delta H_{t_4}^\circ$ 分别表示标准状态下对应于温度 t_4 的解离反应中系统的摩尔熵和摩尔绝对焓的变化。

基于以上方程计算出化学平衡组分后,根据能量守恒原理要求燃烧反应系统反应物与生成物的绝对焓要相等,采用焓值法中的第一种表达形式列出能量守恒方程如下:

$$M_f(Q_f\tilde{\eta} + d^\circ) + n_a(x_{a,O_2}H_{O_2,t_3} + x_{a,N_2}H_{N_2,t_3} + x_{a,CO_2}H_{CO_2,t_3} + x_{a,Ar}H_{Ar,t_3} + h_{a,H_2O}H_{H_2O,t_3}) = n_g\left(\sum_i^{12}\frac{p_i}{p}H_{g,i}\right) \tag{33}$$

其中 H_{i,t_3} 表示进口空气中各组分 i 在温度 t_3 下的焓, $\tilde{\eta}$ 表示燃气达到平衡时的燃烧效率, 高温时燃料燃烧未完全热损失已经很小, 但是燃气离解是吸热的, 根据燃气中离解组分 CO 、 H_2 、 OH 、 NO 、 H 、 O 、 N 的摩尔分数计算未放出的离解热, 进而计算平衡态下的燃烧效率, 计算公式如下:

$$\tilde{\eta} = 1 - [(1 + x_{a,CO_2}n_a)(Q_{u,CO}x_{g,CO} + Q_{u,H_2}x_{g,H_2} + Q_{u,NO}x_{g,NO} + Q_{u,H}x_{g,H} + Q_{u,OH}x_{g,OH} + Q_{u,O}r_{g,O} + Q_{u,N}x_{g,N})]/[(x_{g,CO_2} + x_{g,CO})Q_{u,f}M_f] \tag{34}$$

式中 $Q_{u,i}$ 表示出口燃气中未燃组分的热损失。

d° 表示定温燃烧焓差, 计算公式如下:

$$d^\circ = \frac{H_{CO_2}^\circ + \frac{a}{2}H_{H_2O}^\circ + \frac{c}{2}H_{N_2}^\circ - \left(1 + \frac{a}{4} - \frac{b}{2}\right)H_{O_2}^\circ}{M_f} \tag{35}$$

式中 H_i° 表示气体在 25℃ 时的绝对焓。

建立的非线性方程组有式(12)~式(17)、式(25)~式(31)、式(33)共 14 个方程, 共包括了 12 种气体组分的分压力 p_i 、燃气的物质的量 n_g 以及燃气温度 t_4 共 14 个未知量。这些方程可在文献[14,17]中查到, 虽作了修改, 但是实质是一样的。

介绍两种求解非线性方程组的数学解法: 三变量迭代法和牛顿法。三变量迭代法是基于范作民提出的双变量迭代法(N_2 和 O_2)的基础上增加一个温度 t 作为迭代变量参与计算, 该方法的优点是算法编程简单、计算速度快且收敛性很好, 缺点为当量比大于 1 时计算有时不收敛, 目前这种求解方法基本满足主燃烧室的测试需求。牛顿法又叫牛顿-拉普森方法(Newton-Raphson), 为了改善迭代收敛和避免燃气组分分压在计算过程中出现负值, 先对非线性方程组和变量取对数形式, 然后采用牛顿法解方程组, 该方法的优点是通用性非常好, 收敛极佳, 迭代时燃气组分初值基本可以任意给定, 而且适用于富油燃烧产物, 不足的是每一次迭代都要计算一次雅可比矩阵, 在国外文献中求解此类非线性方程组多数采用的是牛顿法^[18]。

3 算例及分析

举例比较燃气分析法采用低温算法与高温算

法的差别, 本文低温算法的能量守恒方程表达采用了平均比定压热容法, 当然第一种焓值法同样可以满足求解要求。给定燃烧室进口温度为 400℃, 燃烧室工作压力为 0.5 MPa, 燃料为航空煤油, 氢碳比为 1.923, 燃料低热值为 42 650 kJ/kg, 按照油气比从低到高给定燃气组分(非仪器测量值)用于温度计算方法比较, 计算时不考虑未完全燃烧组分的存在, 而仅考虑热离解现象, 原因在于高温算法的燃气模型并未包括 UHC, 因此实际应用中不适合如慢车状态含有大量 UHC 的温度计算, 因此本文对两种计算方法的比较是为了给出热离解对高温燃气温度计算结果的影响。两种算法的计算结果如表 1 所示, 其中相对误差是以高温算法得到的温度结果为基准。

表 1 显示在低温时, 两种算法得到的燃气温度基本一致, 随着油气比的升高, 低温算法得到的温度结果大于高温算法的结果, 而且温度相差逐渐变大, 这种趋势从图 1 能明显看出。

从表 1 列出的平衡态燃烧效率结果可以看出在燃气温度较低的时候, 平衡态的燃烧效率基本是接近 100% 的, 随着燃烧温度越来越高, 平衡态下的燃烧效率越来越低。

图 2 显示的是随着燃气温度逐渐升高, 燃气平衡态下离解组分的摩尔分数变化趋势, 可以看到各离解组分的摩尔分数基本是随着燃烧温度的上升而增加, 而在接近化学恰当油气比时, CO 的摩尔分数增加得很明显; OH 在贫油时是主要的离解组分, 但是在经历峰值后有下降的趋势; H_2 的变化趋势与 CO 相似; H 和 O 的摩尔分数虽然是增加的, 但是这两种离解组分的摩尔分数相对还是较小的。总体看离解程度是随着燃气温度的升高而逐渐变大的, 离解现象是吸热的, 因此未放出的离解热变大, 从而导致平衡态的燃烧效率下降。

综上可以得出, 热离解现象在低温时作用较弱, 可以忽略不计, 但随着温度的增加, 燃气中离解组分的摩尔分数逐渐增加, 离解程度显著, 实际的放热量减小, 导致燃气温度降低, 因此在高温测量时建立燃气模型是必须要考虑离解组分的。目前在燃烧室出口温度测试中, 燃气分析测试程序根据测试仪器测量到的燃气组分先采用低温算法计算温度, 当计算结果高于 1326℃ 时则选择考虑热离解的高温算法重新计算温度。

表 1 计算结果
Table 1 Calculation results

$x_{g.CO_2} / \%$	油气比	$t_4 / ^\circ\text{C}$		相对误差 / %	燃烧效率 / % (平衡态)
		低温算法	高温算法		
2.5	0.0117	825.7	826.4	0.08	99.95
3.5	0.0164	980.4	980.7	0.03	99.88
4.5	0.0211	1127.1	1126.0	0.10	99.77
5.5	0.0257	1266.7	1263.1	0.29	99.62
6.5	0.0302	1400.1	1392.5	0.55	99.45
7.5	0.0347	1527.7	1514.5	0.87	99.24
8.5	0.0392	1650.1	1629.4	1.27	98.99
9.5	0.0436	1767.6	1736.7	1.78	98.69
10.5	0.0480	1880.6	1835.5	2.46	98.29
11.5	0.0524	1989.3	1924.5	3.37	97.75
12.5	0.0567	2094.1	2001.1	4.65	97.01
13.5	0.0609	2195.2	2062.1	6.45	96.01
14.5	0.0652	2292.9	2101.8	9.09	94.60
15.0	0.0673	2340.6	2110.0	10.93	93.67

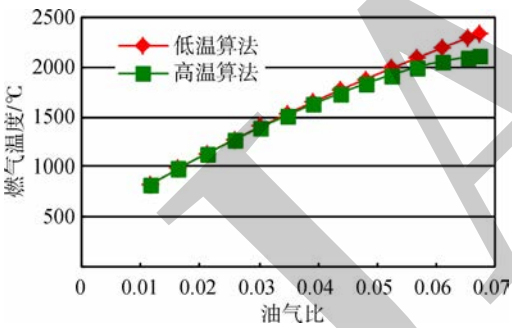


图 1 两种计算方法的温度对比

Fig. 1 Comparison between two calculation method

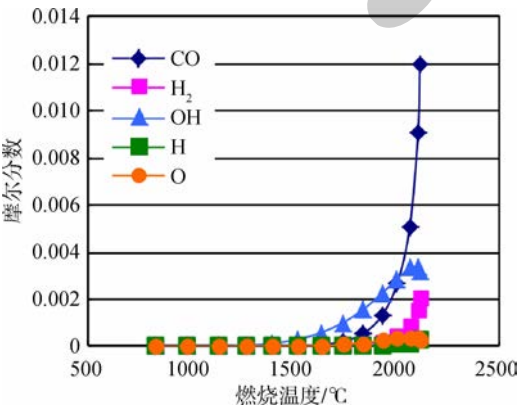


图 2 平衡态下各离解组分的摩尔分数

Fig. 2 Molar fraction of dissociation components at equilibrium state

4 结 论

- 1) 本文介绍的燃气温度计算方法考虑了不同测温范围燃气组成的不同,建立具有代表性的燃气模型,保证温度计算精度,适用性很好,基本满足现阶段燃烧室出口温度的测试需求。
- 2) 在高温时考虑燃气中离解组分,温度计算复杂,需要求解非线性方程组,三变量迭代法和牛顿法都是合适的数学解法。
- 3) 通过算例分析高低温两种计算方法的差别,随着温度的升高,两者得出的温度结果相差变大,高温算法结果低于低温算法结果,原因在于燃气温度变高,燃气中离解组分的摩尔分数变大导致实际放热量减少,燃气温度相应降低。
- 4) 从两种计算方法的结果相对误差可以看出热离解对燃气温度计算的影响,因此在采用燃气分析测温时要合理选择对应的算法。

参考文献:

[1] 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.

[2] 黄春峰,石小江,钟华贵. 燃气涡轮发动机高温燃气温度测量技术[R]. 北京:2008 年第九届发动机试验与测试技术学术会议,2008.

[3] E-31 Engine Aircraft Exhaust Emissions Committee. Procedure for the analysis and evaluation of gaseous emissions

from aircraft engines; ARP1533C [S]. New York; SAE International, 2016: 1-44.

[4] E-31 Engine Aircraft Exhaust Emissions Committee. Procedure for the continuous sampling and measurement of gaseous emissions from aircraft turbine engines; ARP1256D [S]. New York; SAE International, 2016: 1-19.

[5] 李卫东. 一种根据燃气成分计算燃气温度的方法[J]. 中国民航学院学报, 2006, 24(4): 23-26.
LI Weidong. Method of calculating gas temperature based on gas composition[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2006, 24(4): 23-26. (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] BIDEAU R J. The development of a computer code for the estimation of combustor exhaust temperature using simple gas analysis measurements[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(1): 80-88.

[8] 王明瑞, 肖阳, 韩冰, 等. 燃气分析法测量航空发动机五头部燃烧室温度场[J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2049-2054.
WANG Mingrui, XIAO Yang, HAN Bing, et al. Temperature field test for aeroengine combustor with five nozzles based on gas analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2049-2054. (in Chinese)

[9] 王明瑞, 肖阳, 韩冰, 等. 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, 2015, 30(11): 2568-2574.
WANG Mingrui, XIAO Yang, HAN Bing, et al. Gas analysis test and calculation method of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(11): 2568-2574. (in Chinese)

[10] 张群, 黄希桥. 航空发动机燃烧学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[11] 屠秋野, 王占学, 王曙, 等. 化学平衡对燃气涡轮发动机循环性能影响[J]. 航空动力学报, 1998, 13(2): 195-198.
TU Qiuye, WANG Zhanxue, WANG Shu, et al. Research on effect of chemical-equilibrium on thermodynamic cycle performance of gas turbine engines[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(2): 195-198. (in Chinese)

[12] 廖世勇, 蒋德明, 曾科. 碳氢燃料燃烧热效应的化学平衡算法[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(3): 229-233.
LIAO Shiyong, JIANG Deming, ZENG Ke. Method to estimate thermal results of hydrocarbon combustion based on chemical equilibrium[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(3): 229-233. (in Chinese)

[13] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 9 册 主燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

[14] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 1 册 通用基础[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

[15] TURNSS R. 燃烧学导论: 概念与应用[M]. 姚强, 李水清, 王宇, 译. 北京: 国防工业出版社, 2015.

[16] 范作民. 焓值表及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.

[17] 范作民, 傅巽权. 热力过程计算与燃气表[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.

[18] LANZAFAME R, MESSINA M. A new approach to Newton-raphson method to evaluate thermodynamics properties for a "in-equilibrium" combustion mixture[R]. SAE Technical Paper Series 2007-01-0024, 2007.

(编辑: 陈 越)