

气膜冷却燃烧室火焰筒二维壁温分布计算

北京航空航天大学 韩振兴* * 朱谷君 冀守礼 龙迎天

【摘要】 采用二维轴对称模型,用有限元素法,以气膜冷却火焰筒外环整体为对象进行壁温分布计算。开发了计算机程序,得到了合理、精度良好的温度分布。结合内环头部及其它算例的计算,结果表明该程序具有良好的工程应用价值,对于燃烧室的优化设计及应力分析有重要作用。

主题词: 燃烧室 火焰筒 传热 有限元法

分类号: V231.13

1 计算模型

二维轴对称稳态导热微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (1)$$

边界条件为第 I 类 $T|_{\Gamma_T} = T$ 已知, 第 II 类 $-\lambda(\partial T / \partial n)|_{\Gamma_q} = q$, 第 III 类 $-\lambda(\partial T / \partial n)|_{\Gamma_h} = h(T - T_o)$ 。

对应上述问题的泛函表达式为:

$$J(T) = \iint \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 \right] dx dr - \int_{\Gamma_h} r h \left(T_o T - \frac{1}{2} T^2 \right) ds + \int_{\Gamma_q} r q T ds \quad (2)$$

式中: x, r 为轴向、径向坐标, λ 为导热系数, T 为温度, T_o 为周围介质温度, q 为热流密度, h 为换热系数, $\Gamma_T, \Gamma_q, \Gamma_h$ 分别为第 I、II、III 类边界。

将计算对象划分成 NEL 个 3 结点三角形环元素。元素的 3 个节点为 i, j, m , 则单元内温度插值函数可表示为:

$$T = \frac{1}{2\Delta} \sum_{k=i,j,m} (a_k + b_k x + c_k r) T_k \quad (3)$$

或

$$T = [N] \{T\}^e \quad (4)$$

式中

$$[N] = [N_i, N_j, N_m], \quad \{T\}^e = \{T_i, T_j, T_m\}^T$$

$$\left. \begin{aligned} N_i &= (1/2)(a_i + b_i x + c_i r) \\ a_i &= c_j r_m - x_m r_j \\ b_i &= r_j - r_m \\ c_i &= x_m - x_j \end{aligned} \right\}_{i,j,m}, \quad \Delta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & r_i \\ 1 & x_j & r_j \\ 1 & x_m & r_m \end{vmatrix} = \frac{1}{2}(b_i c_j - b_j c_i)$$

为单元面积。边界线段 i, j 的长度 $L = [(x_i - x_j)^2 + (r_i - r_j)^2]^{1/2}$ 。温度插值函数为:

$$T = (1 - t) T_i + t T_j \quad (5)$$

式中 $t = s/L$, s 为距节点 i 的距离。

将单元内及边界线段上的温度分布公式代入泛函表达式(2), 则可得到 J^e 及 $(\partial J^e)/(\partial \{T\}^e)$ 的表达式。对于计算域上的任一点 M , 把所有与 M 点有关的元素进行单元分析, 将其系数和常数部分按 $\partial J/\partial T_M = \sum(\partial J^e/\partial T_M) = 0$ 建立代数方程。

对所有的节点可得到代数方程组

$$[R]\{T\} = \{F\} \quad (6)$$

采用 Cholesky 法求解方程组(6)可得出整个计算域上的温度分布。

2 边界条件处理及计算公式

以环形燃烧室火焰筒外环为计算对象, 与之相应的边界为辐射与对流的复合换热。如图1所示, 表面1为燃气与壁的辐射换热及气膜与壁的对流换热的复合。表面2为外冷却空气与壁的对流换热及表面2与燃烧室外壳之间的辐射换热的复合, 表面3、4为冷却空气与壁的对流换热及3、4表面间的辐射换热的复合, 表面5也为辐射与对流的复合换热。

标准二维导热程序 TDDC 要求边界条件按 I、II、III类边界的形式给出, 所以计算中作了以下处理: 1、3、5表面以第II类边界条件的形式给出, 其热流为总热流, 其中5表面近似取 $q = 0$ 。2、4表面以第III类边界条件的形式给出, 其换热系数为总换热系数、流体温度为冷却空气温度。各边界条件具体计算公式为:

燃气侧气膜冷却段(表面1)第II类边界

$$q_1 = q_{c1} + q_{r1} = \alpha(T_{aw} - T_{w1}) + [(1 + \epsilon_w)/2]\epsilon_g\alpha(T_g^4 - T_g^{1.5}T_{w1}^{2.5})(T_g/T_g)^d$$

$$\epsilon_g = 1 - \exp[-2.9 \times 10^4 BP(rl)^{0.5} T_g^{-1.5}]$$

$$T_{aw} = T_g - \beta\eta_o(T_g - T_c)$$

$$\beta = [1 + c_o(x/SM)]/[1 + c_m(x/SM)] \quad c_o = 0.05, \quad c_m = 0.1$$

η_o 及 α 按文献[2]公式计算。

式中 $(T_g/T_g)^d$ 为非一维辐射修正因子, $M = \rho_{us}/\rho_{gus}$ 为吹风比, ϵ_w 、 ϵ_g 为壁面及燃气黑度, r 为油气比, l 为辐射平均行程 $l = 0.6d_{eg}$ (d_{eg} 火焰筒当量直径), B 为亮度因子, 主燃区 $B = 4$ 、补燃区 $B = 3$ 、掺混区 $B = 2$, T_c 为冷气温度。

外冷却通道一侧(表面2)第III类边界

$$\alpha = q_2/(T_c - T_{w2})$$

其中

$$q_2 = q_{c2} + q_{r2} = \alpha(T_c - T_{w2}) + [\epsilon_w/(2 - \epsilon_w)]\alpha(T_c^4 - T_{w2}^4)$$

$$\alpha = 0.023 Pr_c \lambda_c (\rho_{2u2}/\mu_c)^{0.8} d_{e2}^{-0.2}$$

d_{e2} 为外冷通道当量直径。

冷气缝槽处(表面3、4)

$$\alpha = 0.023 Pr_c^{0.4} \lambda_c (\rho_{3u3}/\mu_c)^{0.8} (2s)^{-0.2}, \quad (s \text{ 为气膜缝出口高度})$$

$$q_3 = \alpha(T_c - T_{w3}) + [\epsilon_w/(2 - \epsilon_w)]\alpha(T_{w4}^4 - T_{w3}^4)$$

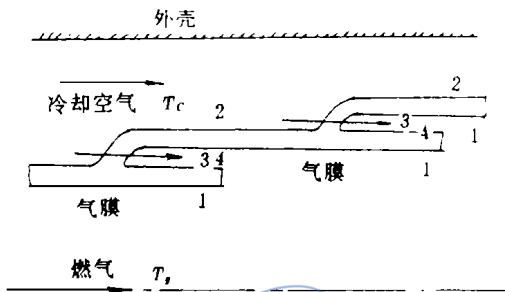


图1 复合换热示意图

$$\alpha_s = \alpha_g + \epsilon_w / (2 - \epsilon_w) \sigma (T_{w3}^4 - T_{w4}^4) / (T_c - T_{w4})$$

下角标 c 为冷却空气, g 为燃气, s 为气膜缝出口。

3 计算程序与计算结果

计算程序编制成可计算各种边界条件的二维通用程序 TDDC。共包括单元分析 EMTR、边界元分析 BOUND、组集 SUMAT、求解 SOLV 及 II、III 类边界条件计算 BOUQH 5 个子程序及 INP1.DAT、INP2.DAT、OUTPUT 3 个数据文件。总节点数 NPO、总单元数 NEL、第 I、II、III 类边界数目 LNT、LNQ、LNH, 各节点坐标 X(I)、R(I), 各元素的 3 个节点号 KAK(I, J), 各第 I、II、III 类边界对应的节点号 LET(I)、LEQ(I, J)、LEH(I, J)。第 I 类边界节点温度 BTW(I) 由 INP1.DAT 输入。计算 II、III 类边界热流 BQW(I), 换热系数 BNH(I) 及介质温度 BNT0(I) 所需原始参数由 INP2.DAT 输入。OUTPUT 为 NPO 个节点温度的输出文件。尽管求解线性代数方程组时采用了 Cholesky 直接解法, 但由于无论是第 II 类边界的热流 BQW, 还是第三类边界的换热系数 BNH 都与求解的壁温分布有关, 且几乎所有节点都在边界上。所以实际的求解过程仍为壁温分布与边界条件的迭代过程。控制的迭代精度为: $\Delta T / T_w \leq 0.001$ 。

对某型发动机燃烧室火焰筒外环壁温分布进行了计算。计算中共划分 167 个节点、166 个单元。第 II、III 类边界数各 83 个、无第 I 类边界。7 个气膜段按 13 个计算截面计算边界总热流及总换热系数、中间按线性插值处理。其元素及节点划分及温度分布计算结果示于图 2。图中标出了相应计算状态及计算位置的温度实测值^[4]。除第 I 气膜段温度水平较低, 第 IV 气膜段温度水平较高外, 其余气膜段温差水平并不悬殊。第 I 段壁温低的原因是气膜短及对应的燃气温度

低, 第 IV 气膜段温度高的原因是气膜段长后部气膜冷却失效及对应燃气温度较高。整个壁温分布呈锯齿形。每一气膜段冷气进口壁温低, 之后由于气膜效果减弱而壁温上升。在两个气膜段连结处由于壁中的导热作用及温度分布的连续性, 无论火焰筒外侧或内侧的壁温分布均非单调变化而出现极值, 呈波浪形。

在冷气缝槽处的 1-4 表面, 由于边界环境不同而具有不同的温度。如第 III 气膜段末端 1、4 表面温度相差 10~15℃, 第 IV 气膜段末端 1、4 表面相差 20~25℃, 而 2、3 表面都与冷气接触温度相差不大, 3 表面稍高。

以外环整体为计算对象并采用二维轴对称导热模型, 较详细地考虑了轴向、径向导热, 复

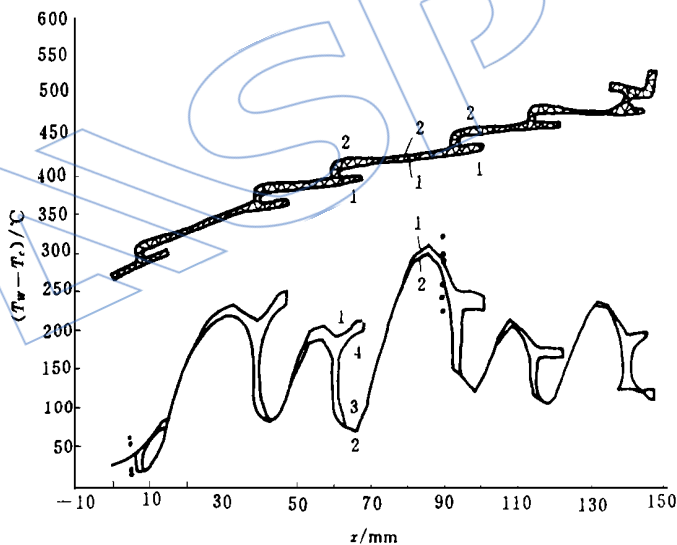


图 2 温度分布计算结果

杂几何参数及边界条件的影响。所得温度分布具有良好的连续性及合理性, 各段温度分布趋势合理、过渡平滑。尤其对于冷却空气入口部位、几何及换热情况复杂, 内外温差极大, 整体二维计算就更具优越性。所得温度分布对应力分析及火焰筒故障诊断是很有帮助的。

从实测点与计算曲线的比较可知, 本计算的精度是好的, 计算值与实测值的最大相对偏差 $\pm 7\%$, 如果考虑计算值与实测平均值的偏差就更小(图中各气膜段的温度实测值为周向不同位置的测量值)。此外, 程序对内环、头部也作了计算, 均得到较满意结果。

4 结论

采用二维轴对称模型、三角形环元素、以火焰筒外环整体为对象、计算其壁温分布, 较之一维计算更加详细、合理、可靠, 在几何及换热复杂部位更显其优越性。算例表明, 计算结果精度良好, 有工程实用价值。

参 考 文 献

- 1 朱谷君编. 热传导及流体流动的数值解法. 北京航空航天大学, 1992
- 2 葛绍岩等. 气膜冷却. 北京: 科学出版社, 1985
- 3 朱长清等. 燃气涡轮发动机燃烧室火焰筒壁温计算. 1990
- 4 Cleason C C, Oller T L, Shaysen M W, Babr D W. Evaluation of Fuel Character Effects on 179 Engine Combustion System. AEAPL TR- 79- 2015, 1979

(责任编辑 杨再荣)