

文章编号: 1000-8055(2010)03-0515-06

运用区域法模型计算燃烧室内一维辐射换热

毛文懿, 林宇震, 许全宏, 刘高恩

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 采用一种机理严密, 精度高的区域法辐射换热模型用于燃烧室壁温计算. 采用 Lefebvre 模型和区域法模型计算了一个圆筒型不冷却火焰筒结构的换热; 对比分析了两种方法计算的壁面辐射热流密度和壁面温度分布情况. 结果表明, 使用 Lefebvre 模型计算时, 由于将燃气按一维划分为定向辐射, 在燃烧室前后壁面辐射热流密度较小, 存在一定不足; 而使用区域法模型计算时, 辐射热流密度分布更趋合理.

关 键 词: 燃烧室; 区域法; 辐射热流密度; 壁温

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Calculation of one-dimensional radiative heat transfer with zonal model in combustor

MAO Wen-yi, LIN Yu-zhen, XU Quan-hong, LIU Gao-en

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: A new kind of zonal model for calculating the combustor wall temperature with strict mechanism and high precision was developed in this paper. The Lefebvre model and zonal model were adopted to calculate the radiative heat transfer of a cylindrical combustor without cooling. The distribution of radiative heat flux density and wall temperature was obtained respectively by comparing and analyzing the two different methods. The results show that, there are some shortages for Lefebvre model because gas is partitioned as 1-D directional radiation causing the radiative heat flux density of combustor front and back walls smaller, while the radiative heat flux density distribution tends to be more reasonable with zonal model.

Key words: combustor; zonal method; radiative heat flux density; wall temperature

随着现代航空技术的发展, 燃烧室燃气温度可达 2000 °C, 甚至更高. 为防止火焰筒的损坏, 提高使用期限, 必须采取更加合理高效的冷却设计, 保证火焰筒壁温在材料的允许范围内. 这意味着要更好地了解燃烧室壁面冷却的传热过程. 对大多数情况而言, 在燃烧室主燃区由热气向壁面传热的一大部分是辐射换热, 在火焰筒存在很有效的气膜冷却情况下, 辐射换热甚至是唯一的由燃

气到壁面的传热^[1].

目前, 对于火焰筒的一维壁温计算中^[2-4], 辐射热流密度计算是在 Lefebvre 零维模型基础上, 人为地沿轴向将燃烧室内燃气按一维划分为定向辐射, 不考虑某燃气区域对附近壁面的辐射, 这种方法由于计算方法比较简单, 易于工程计算中, 但是由于过于简化, 不能反映实际燃烧室火焰筒内的辐射换热过程.

收稿日期: 2009-02-24; 修订日期: 2009-05-15

作者简介: 毛文懿(1984-), 男, 湖南岳阳人, 硕士生, 主要从事燃烧室火焰筒辐射换热研究.

在求解辐射传递方程的各种解法中,区域法(zonal method)^[5]的机理最严密,精度也最高,它经过不断的改进与发展,已在锅炉的工程计算中得到了应用^[5-7].本文中对比分析了Lefebvre零维模型描述辐射热流密度、使用区域法模型描述辐射热流密度两种方法,用于一维燃烧室壁面温度计算中.

1 区域法模型

区域法^[5]由Hottel H C于1954年提出.其基本思想是将燃烧室的壁面和气体分成很多的区域,使每个区的温度及物理性质都可以看成一致的.区与区之间的辐射换热可以根据辐射传热的基本理论求出区与区之间的直接交换面积,总交换面积及定向流面积,进而求得区与区之间的辐射传热速率.

对每一种灰气体计算各区域之间的直接交换面积,然后求得总交换面积 $\overline{S_i S_j}$, $\overline{G_i S_j}$, $\overline{G_i G_j}$ 等.则可以得到各区域之间总的辐射定向总交换面积为

$$\overline{S_i S_j} = \sum a_n(T_g, T_s) (\overline{S_i S_j})_{k,n} \quad (1)$$

$$\overline{S_i G_j} = \sum a_n(T_g, T_s) (\overline{S_i G_j})_{k,n} \quad (2)$$

$$\overline{G_i G_j} = \sum a_n(T_g) (\overline{G_i G_j})_{k,n} \quad (3)$$

$$\overline{G_i S_j} = \sum a_n(T_g) (\overline{G_i S_j})_{k,n} \quad (4)$$

式中 $a_n(T_g)$ 和 $a_n(T_g, T_s)$ 分别为计算真实气体黑度和吸收率时第 n 种灰气体的加权因子, T_g , T_s 分别为气体温度和壁面温度, $n=0$ 表示透明气体.气体的总吸收率除与气体的温度有关外,还依赖于辐射源的温度.由不同的方法得到 a_n 后,就可以将它们引入辐射传递方程,计算有气体介质参与的燃烧室辐射换热.本文中所取参数 a_n 由Lefebvre模型中的气体黑度性质描述反算得到.

2 壁面换热物理模型

对于航空发动机燃烧室,由于火焰筒的壁厚相对于火焰筒的直径而言足够小,从而可以把圆环拉伸当作平板来计算.忽略了径向导热,可以简化为一维轴向导热问题.燃烧室火焰筒壁面换热平衡示意图如图1所示.

在稳态下,对于火焰筒上很小的一段单元(径向取壁厚,周向取整个环段周长,轴向取网格长),可以假设其内外壁的面积相同,故其热平衡公式可以写为

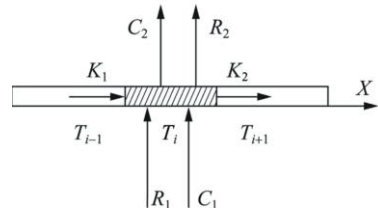


图1 燃烧室火焰筒壁面热平衡示意图

Fig. 1 Sketch of the heat balance of combustor flame tube wall

$$(R_1 + C_1)\Delta x + K_1 t_w = (R_2 + C_2)\Delta x + K_2 t_w \quad (5)$$

式中 R_1 为燃气对火焰筒内壁的辐射热流密度(W/m^2);

C_1 为燃气与火焰筒内壁的对流换热热流密度(W/m^2);

R_2 为火焰筒外壁对燃烧室机匣的辐射热流密度(W/m^2);

C_2 为环腔内的冷却空气与火焰筒外壁的对流换热热流密度(W/m^2);

K_1, K_2 为壁面单元间的轴向导热热流密度(W/m^2);

Δx 是两个计算单元中心的轴向距离(m);

t_w 是燃烧室壁面厚度(m).

另外,图1中 T_i, T_{i+1}, T_{i-1} 分别是计算壁面单元及相邻壁面单元的中心温度.

对于 N 个单元组成的一个火焰筒壁面,根据式(5)再加上边界条件可以得到一个闭合的方程组,通过传热学分析可以写出式(5)中各参数的具体表达式.从而求出燃烧室壁温分布.

3 计算方法

3.1 燃烧室内对流换热热流密度 C_1

$$C_1 = 0.020 \frac{\kappa_g}{D_l^{0.2}} \left(\frac{m_g}{A_1 \mu_g} \right)^{0.8} (T_g - T_i) \quad (6)$$

其中 κ_g 为燃气导热系数, D_l 为火焰筒直径(m), m_g 是燃气流量(kg/s), A_1 是火焰筒截面积(m^2), μ_g 为燃气黏性系数, T_g 代表燃气温度(K).

3.2 外壁与环腔冷却空气的对流换热热流密度 C_2

$$C_2 = 0.020 \frac{\kappa_c}{D_{an}^{0.2}} \left(\frac{m_{an}}{A_{an} \mu_c} \right)^{0.8} (T_i - T_3) \quad (7)$$

其中 κ_c 为冷却气导热系数, D_{an} 为环腔的平均水力直径(m), m_{an} 是环腔空气流量(kg/s), A_{an} 是环腔流通面积(m^2), μ_c 为冷却气黏性系数, T_3 代表外环冷却气温度(K).

3.3 外壁对机匣内壁的辐射热流密度 R_2

由于火焰筒外壁对燃烧室机匣的辐射热流密度通常是比较小的,实际工程中可用如下公式计算:

$$R_2 = z\sigma(T_1^4 - T_3^4) \tag{8}$$

其中 $z = \frac{\epsilon_w \epsilon}{\epsilon_c + \epsilon_w(1 - \epsilon_c)(A_{ext}/A_c)}$, ϵ_w, ϵ_c 分别是壁面黑度和机匣黑度, A_{ext} 是火焰筒外表面表面积, A_c 是机匣表面积, σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数.

3.4 轴向导热热流密度 K_1 和 K_2

轴向导热热流密度 K_1 和 K_2 分别为

$$K_1 = \frac{\kappa_w}{\Delta x}(T_{i-1} - T_i) \tag{9}$$

$$K_2 = \frac{\kappa_w}{\Delta x}(T_i - T_{i+1}) \tag{10}$$

其中 κ_w 是火焰筒壁的导热系数, Δx 是两个计算单元中心的轴向距离.

3.5 燃气对火焰筒内壁的辐射热流密度 R_1

采用 Lefebvre 提出的零维模型计算 R_1 的计算公式为^[8]

$$R_1 = \sigma \left[\frac{1 + \epsilon}{2} \right] (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_i^4) A_{int} \tag{11}$$

式中 ϵ_i 为火焰筒内壁的平均黑度; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_g 为燃气温度(K); A_{int} 火焰筒内侧表面积(m^2); ϵ_g 为燃气的黑度系数, α_g 为燃气的吸收率.

当采用区域方法计算辐射热流密度 R_1 的计算公式为

$$R_1 = \sum_j \overrightarrow{S_j S_i} \sigma(T_{s,j}^4 - T_{s,i}^4) + \sum_j \overrightarrow{G_j S_i} \sigma(T_{g,j}^4 - T_{s,i}^4) \tag{12}$$

其中 $T_{g,j}, T_{s,j}, T_{s,i}$ 分别为对应单元的温度.

4 算例及结果分析

图 2 为本文的计算模型, 为一直圆筒形燃烧室通道, 其几何结构尺寸为: $D_c \times D_i \times L = 0.685 \text{ m} \times 0.52 \text{ m} \times 0.185 \text{ m}$.

计算边界条件的约定为: 燃烧室进口压力为 2 MPa, 总油气比为 0.032, 进口温度分别为 300, 450, 600, 750, 810 K. 燃烧室进口等效为 1000 K 的灰体壁面, 出口根据设定工况下的燃烧室温度, 等效为相应温度的灰体壁面^[9], 壁面和进出口等效灰体壁面黑度取 0.7. 燃烧室内燃气温度沿轴向分布根据设定燃烧室参数查温升表^[10] 确定, 参

见图 3.

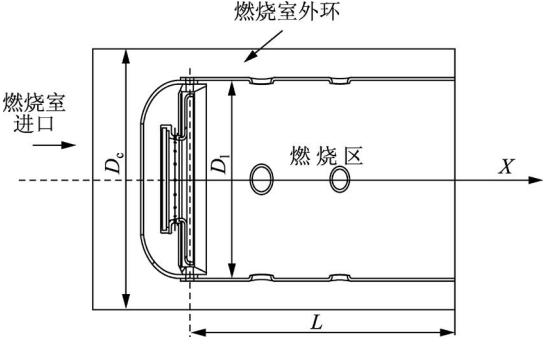


图 2 燃烧室几何模型示意图

Fig.2 Schematic drawing of combustion geometric model

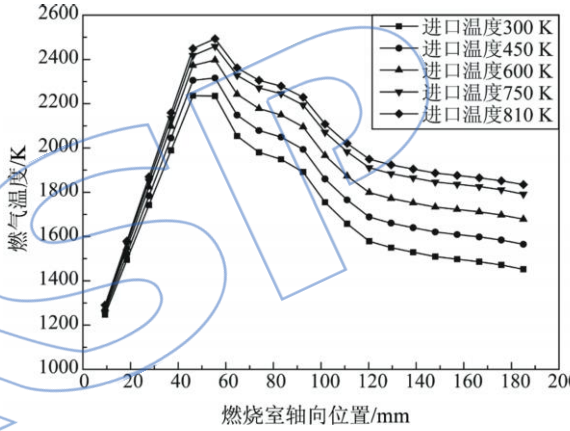


图 3 燃气温度分布

Fig.3 Gas temperature distribution

本文中计算模型火焰筒壁面不使用气膜冷却. 尽管不冷却火焰筒壁温的计算与实际有气膜冷却的火焰筒壁温有很大差别, 但是计算不冷却的壁温可以预示进口状况变化对壁温变化的影响; 能更清晰的显示辐射热流密度、壁温的变化规律.

进口温度的变化会导致燃气温度变化, 燃烧室外环冷却气温度变化. 计算时将燃烧室沿 x 轴方向分成 20 个区域, 根据燃烧室壁面换热物理、数学模型编写程序, 计算了进口温度分别为 300, 450, 600, 750, 810 K 时, 燃烧室壁面辐射热流密度和壁面温度的变化规律.

4.1 用 Lefebvre 模型计算辐射热流密度

当采用 Lefebvre 模型计算燃烧室辐射热流密度时, 其计算结果示于图 4、图 5. 从图 4 中辐射热流密度的变化规律可以看出: 辐射热流密度沿轴向分布的规律为在进口和出口处辐射热流密度值较小, 在燃烧室轴向位置 $x = 46.25 \text{ mm}$ 处辐

射热流密度达到最大值. 进口温度为 750 K 时, 辐射热流密度最大达 589.7 kW/m^2 . 在远离高温燃气区的壁面辐射热流密度值大小不到最大热流密度值的 30 %. 随着温度等幅度的升高, 燃烧室后部辐射热流密度表现为升高幅度接近, 在前段壁面辐射热流密度增幅则表现为减小的趋势.

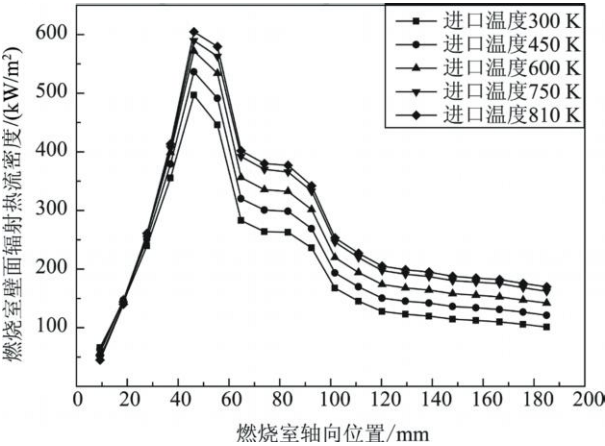


图 4 用 Lefebvre 模型计算进口温度对辐射热流密度的影响
Fig. 4 Effect of inlet temperature on radiative heat flux density by Lefebvre model

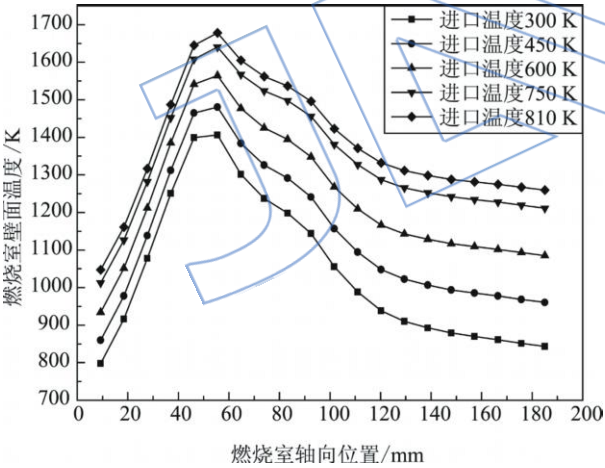


图 5 用 Lefebvre 模型计算进口温度对壁面温度的影响
Fig. 5 Effect of inlet temperature on wall temperature by Lefebvre model

从图 5 中变化规律可以看出, 燃烧室壁面温度最大值出现在主燃孔与掺混孔之间, 对应燃气温度最大值处. 进口温度为 750 K 时, 燃气温度最大值接近 2500 K, 此时, 燃烧室壁面最高温度达到 1640 K. 随着温度等幅度的升高, 壁温升高沿轴向的分布不均匀, 燃烧室壁温升高最大值出现在燃烧室后段接近出口处, 当进口温度升高 150 K 时, 燃烧室后段壁面温度升高接近 130 K, 但是在主

燃区对应壁面附近温度升高幅度仅为 70 K 左右.

4.2 用区域法模型计算辐射热流密度

使用区域法模型计算燃烧室壁面辐射热流密度时, 其计算结果示于图 6、图 7. 从图 6 中可以看出: 辐射热流密度沿轴向分布的规律为在进口和出口处辐射热流密度值较小, 在燃烧室轴向位置 $x = 55.5 \text{ mm}$ 处辐射热流密度达到最大值. 比用 Lefebvre 模型计算时辐射热流密度最大值的计算点向后移了一个单元. 另外辐射热流密度轴向分布较 Lefebvre 模型计算值变化梯度小. 进口温度为 750 K 时计算得到的辐射热流密度最大值为 534.8 kW/m^2 . 较用 Lefebvre 模型计算结果小 10 % 左右. 在远离高温燃气区的壁面辐射热流密度值大小达到最大值的 40 %~50 %, 壁面辐射热流密度比用 Lefebvre 模型计算结果大.

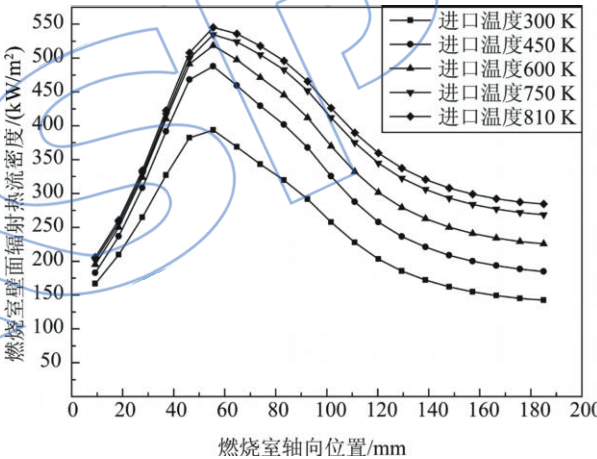


图 6 用区域法模型计算进口温度对辐射热流密度的影响
Fig. 6 Effect of inlet temperature on radiative heat flux density by zonal model

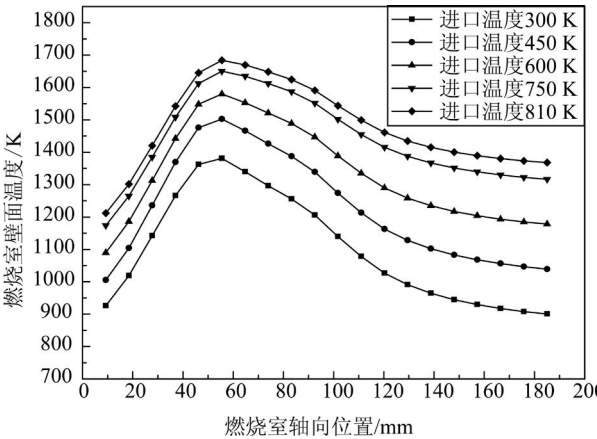


图 7 用区域法模型计算进口温度对壁面温度的影响
Fig. 7 Effect of inlet temperature on wall temperature by zonal model

从图 7 中变化规律可以看出,燃烧室壁面温度轴向分布较用 Lefebvre 模型计算结果变化梯度小.燃烧室温度最大处出现在主燃孔与掺混孔之间.进口温度为 750 K 时,燃烧室壁面最大温度可以达到 1650 K.随进口温度增大,燃烧室壁面温度相应升高,燃烧室壁温升高最大值出现在燃烧室后段接近出口处.当进口温度升高 150 K 时,燃烧室后段壁面温度升高接近 140 K,在主燃区对应壁面附近温度升高幅度也为 70 K 左右.

4.3 两种方法计算结果对比分析

使用 Lefebvre 模型计算辐射热流密度和使用区域法模型计算辐射热流密度这两种方法对于辐射传递过程的描述存在着差异,Lefebvre 模型是在零维模型基础上,将燃烧室内燃气按一维划分为定向辐射.而区域法则考虑了整个模型中各分区域间的辐射相互影响,与实际物理过程更符合.模型差别的简单示意图如图 8 所示.

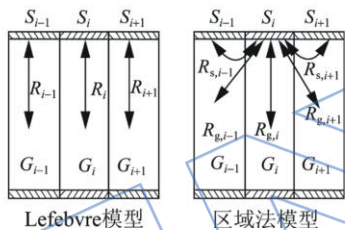


图 8 模型差别的简单示意图
Fig.8 Schematic drawing of the differences between two models

当使用 Lefebvre 模型计算燃烧室壁面辐射热流密度时,分析壁面分区 6,即 $X = 46.25\text{ mm}$ 处辐射热流密度只受 $X = 46.25\text{ mm}$ 处气体区域的影响,其他分区域对此壁面区域的辐射热流密度影响为零,其结果如图 9 中所示,其中横坐标 1~22 分别代表进口、壁面分区 1~壁面分区 20、出口,23~42 代表 1~20 个气体区域.

当使用区域法模型计算燃烧室壁面辐射热流密度时,分析壁面分区 6,即 $X = 46.25\text{ mm}$ 处辐射热流密度受燃烧室所有分区的影响,如图 10 所示(横坐标意义同图 9).其中,气体分区域对此壁面区域的辐射热流密度影响最为显著,对应 $X = 46.25\text{ mm}$ 处的气体区域对壁面辐射热流密度为 232.3 kW/m^2 .此气体区域及前后相邻的两个区域,即从 $X = 27.75\text{ mm}$ 到 $X = 64.75\text{ mm}$ 间的气体区域对壁面分区 6 的总辐射热流密度达到 431.6 kW/m^2 ,占总量的 80 %以上.由于壁面分区

6 温度最高,故壁面分区 6 与其他壁面分区的辐射热流密度为负值,但是其比例较小,所有壁面分区与壁面分区 6 之间的辐射热流密度总和为总量的 - 5 %左右.

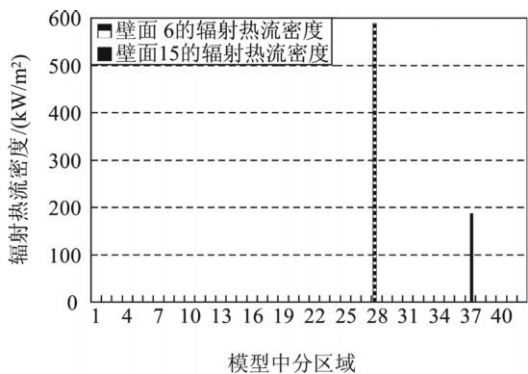


图 9 使用 Lefebvre 模型计算壁面分区 6 和 15 的辐射热流密度
Fig.9 Radiative heat flux density of the wall subarea 6 and 15 by Lefebvre model

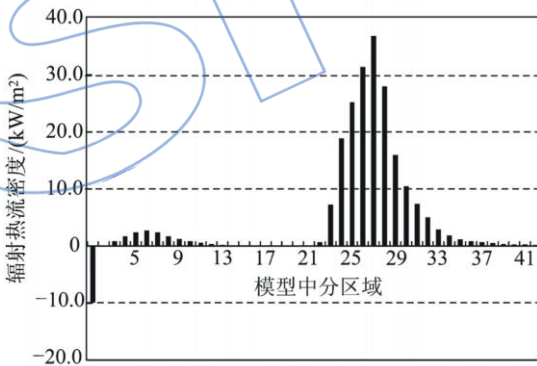


图 10 使用区域法计算壁面分区 6 的辐射热流密度
Fig.10 Radiative heat flux density of the wall subarea 6 by zonal model

另分析使用区域法计算辐射热流密度时壁面分区 15,即 $X = 138.75\text{ mm}$ 处辐射热流密度受燃烧室各分区影响的情况,其结果示于图 11,从图中看出,此壁面主要是接收高温气体区的辐射热流.而与此壁面对应的区域(即 $X = 138.75\text{ mm}$ 处)贡献很小,计算辐射热流密度大小为 306.0 kW/m^2 ,而使用 Lefebvre 模型计算的辐射热流密度大小为 187.4 kW/m^2 .

因为使用 Lefebvre 模型计算时只考虑圆筒壁面包围的气体区对壁面的一维定向辐射影响;而使用区域法模型充分考虑了壁面与壁面,气体与壁面,气体与气体间的相互作用.这样的考虑更符合实际物理过程.使用 Lefebvre 模型在计算主

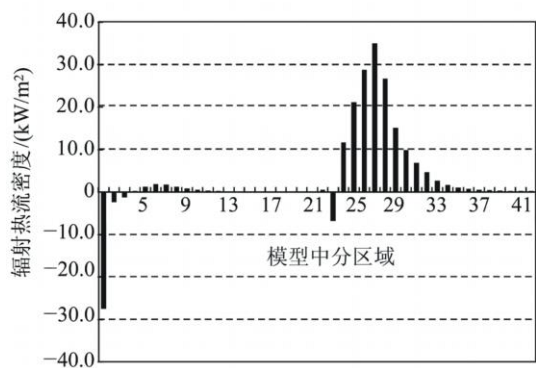


图 11 使用区域法计算壁面分区 15 的辐射热流密度

Fig. 11 Radiative heat flux density of the wall subarea 15 by zonal model

燃区附近壁面(即对应温度较高燃气区域)辐射热流密度时计算结果较好;但是在计算燃烧室前后壁面(即对应温度较低燃气区域)辐射热流密度时,由于此处主要接收的是来自高温燃气区域的辐射热流,而 Lefebvre 模型将实际过程描述为一维定向辐射的假设导致计算结果主要是受低温燃气的辐射影响,存在一定的不足之处,辐射热流密度计算结果也会偏小。

5 总 结

本文对比分析了使用区域法模型与 Lefebvre 模型计算壁面辐射热流密度的情况下,燃烧室火焰筒壁面辐射热流密度与壁面温度的分布情况。

从辐射热流密度计算结果来看,我们可分析总结如下:

1) Lefebvre 模型是一种零维模型,在一维计算中,人为地沿轴向将燃气按一维划分为定向辐射,过于简化,不能反映实际的辐射换热过程,存在一定不足,导致火焰筒前后壁面处辐射热流密度计算结果较小,只为燃烧室最大辐射热流密度值的 30 % 左右。

2) 区域法模型充分考虑了壁面与壁面,壁面与气体,气体与气体间的辐射相互影响,更真实的反映了实际物理过程。在一维计算中,计算辐射热流密度轴向分布更趋合理。此方法也较易实现,是一种基本可用的模型。

3) 本文下一步的工作是根据实际燃烧室的

几何、状态参数,对比辐射,壁温实验数据与区域法模型计算结果。进一步完善区域法模型在一维燃烧室火焰筒壁温计算中的应用。

参考文献:

- [1] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1988.
- [2] 李名家, 曲哲, 林枫, 等. 有隔热涂层的气膜冷却火焰筒壁温计算[J]. 热能动力工程, 2008, 23(5): 481-484.
LI Mingjia, QU Zhe, LIN Feng, et al. Wall temperature calculation of an air-film cooled flame tube with a heat insulation coating[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(5): 481-484, 515. (in Chinese)
- [3] 邢玉明, 赵云惠, 王丰. 某发动机气膜冷却火焰筒壁温的数值计算[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(2): 173-177.
XING Yuming, ZHAO Yunhui, WANG Feng. Numerical calculation of a gas turbine liner wall temperature in the presence of film cooling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1997, 23(2): 173-177. (in Chinese)
- [4] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. USA: Taylor Francis, 1999.
- [5] 黄祖祺, 杨光炯, 于遵宏, 等. 石油化工管式炉的模拟与计算机计算[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993.
- [6] 聂宇宏, 陈海耿. WSGGM 结合离散坐标法研究非灰气体辐射换热问题[J]. 东北大学学报, 2001, 24(4): 443-445.
NIE Yuhong, CHEN Haigeng. Radiative heat transfer analysis of nongray gas using WSGGM and discrete ordinates method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2001, 24(4): 443-445. (in Chinese)
- [7] 聂宇宏, 陈海耿, 杨泽宽. 用灰气体加权和模型研究非灰参与介质炉内的辐射热交换[J]. 工业炉, 1996, 18(3): 11-12.
NIE Yuhong, CHEN Haigeng, YANG Zekuan. Radiative heat transfer analysis of nongray gas using WSGGM method in furnace[J]. Industrial Furnace, 1996, 18(3): 11-12. (in Chinese)
- [8] Lefebvre A H. Heat transfer processes in gas-turbine combustion chambers[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1961, 175(12): 641-668.
- [9] Nelson H F. Radiative heating in scramjet combustors[C]// 31st Thermophysics Conference. New Orleans, LA, USA: AIAA, 1996.
- [10] 范作民, 付翼权. 热力过程计算与燃气表[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.