

燃烧室中辐射热流分布的蒙特卡罗计算

北京航空航天大学 张建强* 朱谷君

【摘要】 本文用蒙特卡罗法计算了燃烧室壁面辐射热流密度分布。计算中考虑了燃气参数如：压力、温度、燃气组分及燃气的吸收和发射特性沿燃烧室轴向、径向和周向的变化。详细地说明了计算过程并进行了算例计算。计算所得热流密度值与分布规律是合理的。

主题词：蒙特卡罗 燃烧室 辐射 热流动 计算

分类号：V 231.1

1 计算模型

用蒙特卡罗法计算燃烧室中的辐射热流密度，可以考虑每个壁面单元和燃气单元对所有壁面单元的热辐射，而不是只考虑某段燃气对其所对应的壁面的热辐射传递。因而能更真实地模拟实际辐射传递过程。计算结果也更合理^[1]。

本计算根据常用燃烧室的几何形状，将一环形燃烧室简化为由纵向剖面上的 10 条直线（内、外壁各 4 条和进、出口各 1 条，见图 1）绕发动机轴旋转所构成的封闭腔为计算域。该几何形体由纵向剖面上封闭折线的 10 个转折点的坐标值确定。当构成内壁的各直线与发动机轴线平行且回转半径为零时，即可构成单管燃烧室或加力燃烧室的几何形体。

计算域内的网格，在周向上以等圆周角划分。为了减小计算工作量，对于环形燃烧室，本文只计算单个喷嘴所对应的空间的辐射热流密度分布。其它喷嘴所对应的空间情况与此相同。计算域在纵向剖面上网格的划分方法为：沿燃烧室轴向，首先划分出四个“区段”（如图 1 所示），每个区段再分为若干希望的等分。燃烧室径向网格划分是将各区段界限均分成相同的等分，然后连接对应的各等分点以构成单元。计算点为空间单元或表面单元中点。计算域内各单元被认为是一个稳态辐射热源，其辐射能各向同性地向四面八方传递，各单元均有吸收和发射性质。通过统计壁面各单元单位时间内吸收和发射的能量，可最终得到壁面的净辐射热流密度。

燃气单元发射的能量是： $\Delta Q_{e,g} = 4a_g E_b \Delta V$ ，式中 E_b 是计算单元温度下黑体的辐射力； ΔV 为计算单元的体积； a_g 是计算单元燃气的吸收系数，当不考虑发光烟粒子的影响时， a_g 是温度和二氧化碳及水蒸气分压力的函数。本文的计算采用文献[2]引用的“有效带宽”法，按下

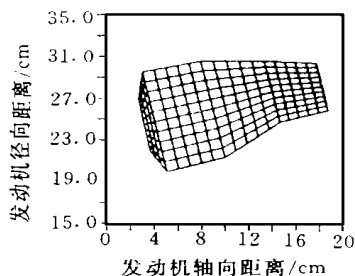


图 1 计算域轴向截面分网图

两式算出: $\epsilon(T, p, S) = \sum_i \frac{E_{b,i} \bar{A}_i}{E_b}$; $a(T, p, S) = -\ln \frac{1-\epsilon}{S}$, 其中 $\epsilon(T, p, S)$ 是气体的发射率, S 是气体的辐射长度, $\bar{A}_i$ 是有效谱带宽度, $E_{b,i}$ 是黑体光谱辐射力。壁面单元发射的能量为: $\Delta Q_{e,w} = \epsilon_w \sigma T_w^4 \Delta A_w$, 其中 ϵ_w 是壁面单元的发射率, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, T_w 是壁面单元的温度, ΔA_w 是壁面单元的面积。单位时间内所有燃气单元和壁面发射的总能量为 $Q_e = \sum_{n_g} \Delta Q_{e,g} + \sum_{n_w} \Delta Q_{e,w}$, 其中 n_g 和 n_w 分别为全部气体单元和全部壁面单元数。将总的发射能

量视为由 N_{TT} 个能束的发射, 则每个能束具有的能量为 $\delta Q = \frac{Q_e}{N_{TT}}$, 每个计算单元的能束数为: $N_g = \frac{\Delta Q_{e,g}}{\delta Q}$ 或 $N_w = \frac{\Delta Q_{e,w}}{\delta Q}$ 。增加 N_{TT} 的值, 可增加每个计算单元的能束数, 使整体被舍掉的能量减少, 提高计算结果的合理性和准确性。每一能束都被认为是从各单元的中心点发射出来, 其方向是由以发射点为中心的球坐标的周向角和法向角决定。这两个角度又由两个随机数决定。对于射线发射的周向角, 因发射是各向同性, 故有 $\varphi = 2\pi \text{RAN } 1$, $\text{RAN } 1$ 是 $0 \sim 1.0$ 之间的随机数。对于射线发射的法向角, 气体单元与壁面单元有所不同。对于气体单元是: $\theta = \cos^{-1}(1.0 - 2\text{RAN } 2)$, 对于壁面单元 $\theta = \cos^{-1} \sqrt{1.0 - \text{RAN } 2}$, 式中 $\text{RAN } 2$ 为 $0 \sim 1.0$ 之间的随机数。

任一发射的能束在其到达固体壁面之前, 均要经过一些计算域内的气体单元, 由于气体本身的吸收特性, 使得发射的能束在经过吸收性的气体时, 均要被气体吸收掉一部分能量, 而使能束自身穿过气体的能量被减弱, 其减弱的程度与吸收性气体的吸收系数及该能束在吸收性气体中的行程即射线长度有关。根据布格尔定律, 气体在经过吸收性介质时, 其辐射强度按下式衰减: $i(s) = i(0) \exp \left[- \int_0^s a(s^*) ds^* \right]$, 式中 $i(0)$ 为初始辐射强度; $i(s)$ 为经过距离 s 的吸收性介质后的辐射强度。根据这一规律, 分别计算出一个能束通过的每个气体单元所吸收的能量, 最后可得到该能束到达壁面时的能量。根据壁面的吸收特性, 将到达壁面的能量当中应该被壁面吸收的部分 (该部分能量的大小取决于壁面的发射率) 计入该壁面单元吸收的总能量中; 反射部分的能量计入需再辐射的能量中, 待全部计算域内每个气体和表面单元的发射能束全部计算完成后, 再对所有壁面单元中需进行再辐射的能量进行计算, 直至所有壁面单元需再辐射的能束数之和小于某一设定值时, 统计计算结束。相加壁面各单元的自身辐射能量和反射 (再辐射) 能量可得各壁面单元的有效辐射; 壁面净辐射热流是通过统计每个壁面单元吸收的全部能量与其自身发射能量的差而获得。

应该说明的是, 使用单喷嘴对应区域性质进行计算时, 当射线长度超出单喷嘴对应区域时, 计算域外的射线所经过的气体单元及到达的壁面单元, 都要根据对称性转换到计算域内来进行相应的计算。

在确定的温度分布及二氧化碳、水蒸气分压分布的情况下, 选用一个适当的总能束数 (例如不小于 20 万) 进行 n 次计算, 求得壁面各单元的辐射热流密度分布。由文献[3], 若将每个计算结果作为一个抽样, 由于随机数不同, 每次抽样计算的结果也不同, 对于 n 次抽样计算结果,

根据总体正态分布规律有: $p \left\{ \left| \frac{\bar{q} - E}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \right| \leq t_{1-\alpha/2}(n-1) \right\} = 1 - \alpha$, 其中 $\bar{q}$ 是抽样结果的平均

辐射热流密度, 即: $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$; E 是辐射热流密度的期望值, s^2 是样本方差, 即 $s^2 =$

$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2$; $1-\alpha$ 是置信水平, 根据选取的置信水平和抽样次数 n , 我们可查取 $t_{1-\alpha/2}(n-1)$ 的值。上式表明, 平均辐射热流密度 $\bar{q}$ 与期望值 E 的偏差以 $(1-\alpha)$ 的概率落在 $\pm t_{1-\alpha/2}(n-1)$ 的范围内。定义相对偏差为: $\text{ERROR} = \frac{t_{1-\alpha/2}(n-1) \sqrt{\frac{s}{n}}}{\bar{q}}$, 最后可将 n 次抽样计算结果用 $\bar{q}$ 和 ERROR 来表示, 其置信度为 $(1-\alpha)$ 。

1) $\sqrt{\frac{s}{n}}$ 范围内。定义相对偏差为: $\text{ERROR} = \frac{t_{1-\alpha/2}(n-1) \sqrt{\frac{s}{n}}}{\bar{q}}$, 最后可将 n 次抽样计算结果用 $\bar{q}$ 和 ERROR 来表示, 其置信度为 $(1-\alpha)$ 。

2 算例结果

算例计算所用的纵向截面上网格划分见图 1; 燃气温度如图 2 所示; 燃气吸收系数在喷嘴截面沿轴向的分布如图 3 所示。每次抽样计算取总能束数为 20 万个, 进行 60 次抽样计算, 计算结果示于图 4~图 6。

图 4 是在本算例输入参数下燃烧室出口辐射热流密度分布。从图中可看出由于本算例输入参数在计算域内环向对称, 故燃烧室出口辐射热流密度分布在环向也基本对称, 辐射热流密度在计算域环向的中点达到环向最大值; 但燃烧室出口辐射热流密度在径向分布的最大值却是在燃烧室出口高度约 2/3 处达到。这一结果我们认为是合理的。

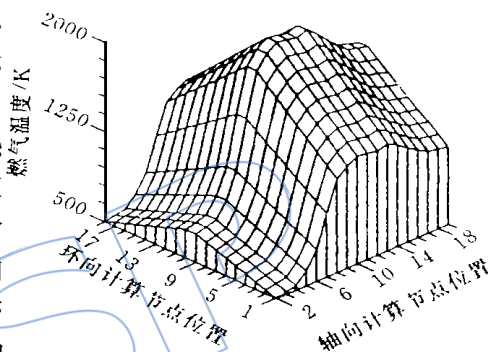


图 2 燃气温度分布图

图 5(a) 和图 6(a) 分别是燃烧室内、外环头端面(图中 z 值从 2~5 对应部分)和内、外环壁面的辐射热流密度分布; 对应的图 5(b) 和图 6(b) 为相应结果的误差分析。从

这些图中我们可以看出辐射热流密度在环向的分布也具有对称性; 辐射热流密度在轴向的分布变化较大, 从燃烧室前端面(图 5(a) 和图 6(a) 中沿 z 轴的 2~5 区域)开始, 辐射热流密度值起初较小, 然后从燃烧室主体与前端面的转折处开始, 辐射热流密度沿轴向迅速上升,

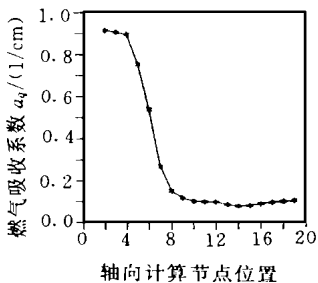


图 3 燃气吸收系数沿轴向分布图

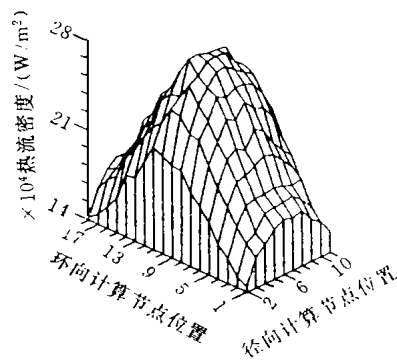


图 4 燃烧室出口截面热流密度分布图

在主燃区附近达到最大值后又开始下降。辐射热流密度的分布情况与输入的燃气温度分布、二氧化碳气体和水蒸气的分压力分布及壁面温度分布有密切关系。值得说明的是, 无论是外筒壁或内筒壁, 辐射热流密度在前端面的值都较小, 这除了燃气参数分布和壁面温度分布的作用以外, 壁面形状及其所处位置的影响也有重要作用。从计算结果看, 我们认为壁面辐射热流密度分布是合理的。误差分析的结果表明, 在本算例的取样及置信水平 $(1-\alpha)$ 选为 0.95 条件下, 所有计算点上的相对误差除个别一些计算点由于在计算域内所处几何位置原因, 使得其捕获能束的几率减小造成相对误差值较大外, 绝大部分计算点上的相对误差值均小于 10%。

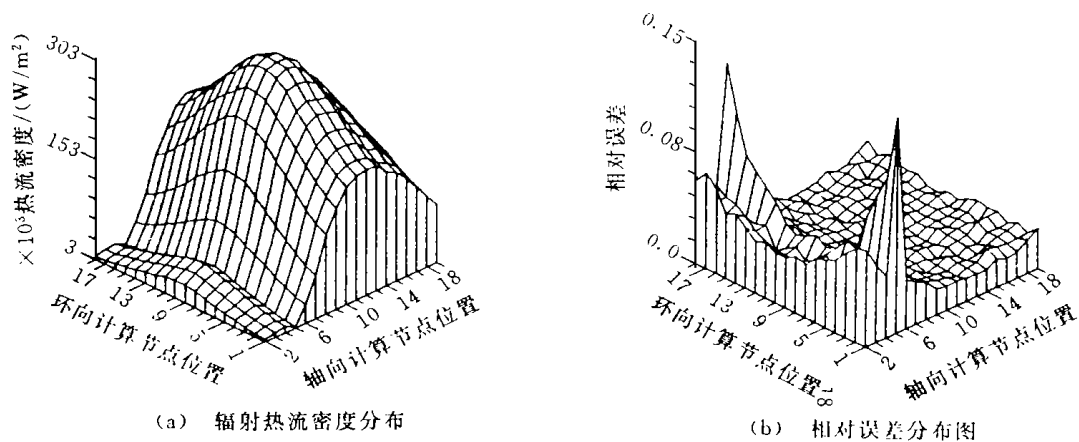


图5 燃烧室外环壁面辐射热流密度和相对误差分布图

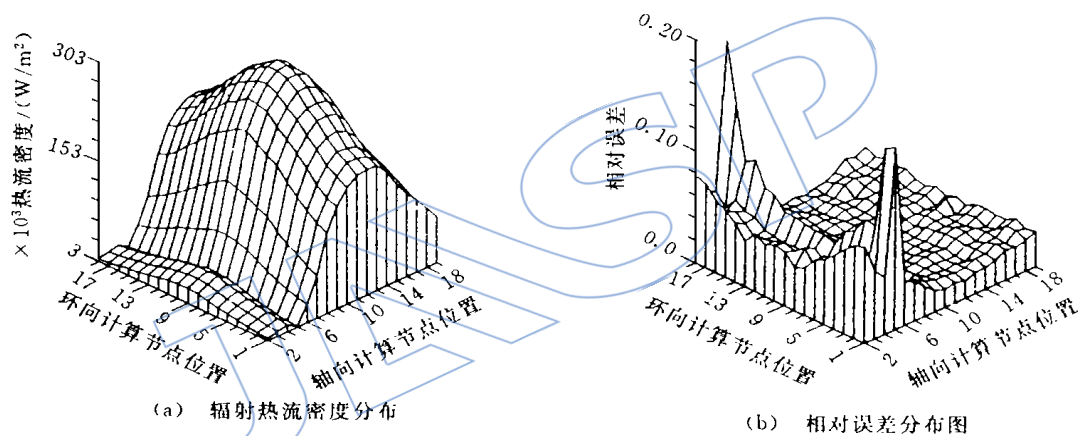


图6 燃烧室内环壁面辐射热流密度和相对误差分布图

3 结 论

根据以上的分析及算例计算的结果,我们认为本文所述的计算模型、计算方法以及研制的计算机程序是合理、可信的,具有较强的工程实用性。

参 考 文 献

- 1 朱谷君,张建强 航空科学基金资助项目研究工作总结 1993
- 2 R. 西格尔, J. R. 豪厄尔著,曹玉璋等译 热辐射传热 北京:科学出版社,1990
- 3 黄午阳 概率统计初步 上海:科学技术文献出版社,1984

(责任编辑 杨再荣)

EFFECTS OF FILM COOLING ON INTERNAL HEAT TRANSFER COEFFICIENTS OF A SQUARE CHANNEL

Wu Hong, Deng Hongwu, Tao Zhi

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT Effects of film cooling on the distribution of internal heat transfer coefficients of turbulent flow through a square channel were investigated experimentally and numerically. The main factors were the inlet Reynolds number and the hole distance ratio under turbulent condition. The investigation showed that the internal heat transfer coefficient was increased greatly with the increase of the inlet Reynolds number whereas its variation was not monotonous with the change of the hole distance ratio. The change of internal heat transfer characteristics was not obvious with hole distance variation.

Key Words Turbulence Blades Heat transfer coefficient Experiment

RADIATION HEAT-FLUX DISTRIBUTION CALCULATION ON COMBUSTOR WALL BY MONTE-CARLO METHOD

Zhang Jianqiang and Zhu Gujun

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT The calculation of the radiation heat-flux on combustor wall and in outlet by Monte-Carlo method takes into account the effects of radiation energy emitted from any single element on all other elements. The calculation gives better prediction of the radiation process in a gas turbine combustor. The radiation heat-flux densities of combustor wall and outlet can be calculated by Monte-Carlo method, provided the temperature, dioxide-carbon partial pressure and water vapor partial pressure distribution in a combustor are known. The changes of gas absorptivity and emissivity in the combustor have been taken into account. A complete computation procedure and related error analysis have been described in detail. A numerical example is given and the calculated results are reasonable.

Key Words Combustion chambers Radiation Heat flow Calculation

INFLUENCES OF MAINSTREAM TURBULENCE AND END-WALL EFFECT ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER OF TURBINE BLADE

Zhu Huiren, Xu Duchun, Guo Tao, Liu Songlin

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT The influences of mainstream turbulence, end-wall effect and mainstream Reynolds number on the beginning location of transition, transition length and heat transfer both in the middle region and root region of a turbine blade were comparatively studied. A five-blade linear cascade in a large-scale low-speed opening wind tunnel was used in the experiment. A thin-foil thermocouple technique was applied to determine the heat transfer coefficients on the blade surface. Three rows of thermocouples located 5 mm, 30 mm and 150 mm in the span-wise direction of blade from end-wall. The mainstream