

文章编号: 1000-8055(2006) 02-0320-06

燃烧过程辐射换热离散坐标模型的应用

李志强

(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重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对离散坐标(DO)辐射传热模型分别在长方体空间和旋流燃烧室内进行了验证与应用。长方体空间的计算结果表明:DO模型的纯辐射传热预报结果比六热流(SHF)模型准确,与计算精确的区域法的计算结果吻合较好,而SHF模型的预报结果却有较大的误差。对于旋流燃烧室内温度场的模拟预报也表明,DO模型的计算结果和实验值相吻合,明显高于用SHF模型计算所得的温度值。另外,DO模型在计算时间和边界处理等方面比区域法优越;在收敛速度和计算准确度等方面也比工程常用的六通量模型优越。

关键词: 航空、航天推进系统; 湍流燃烧; 数值模拟; 辐射换热; 离散坐标模型

中图分类号: TK 224. 11 **文献标识码:** A

Application of Discrete-Ordinates Model to the Study of Radiative Heat Transfer

LI Zhi-qiang

(National Key Laboratory of Aircraft Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The radiative heat transfer model, i. e. Discrete-Ordinates (DO) model, was verified by and applied to a combustion chamber and a three dimensional (3D) swirl combustor. For the combustion chamber, the predicted results of pure radiative heat transfer were in good agreement with those of the zone method, while the SHF model gave relatively large deviations. For swirl combustor, the predicted temperature distribution of DO model were in good agreement with those measured by experiment and were better than those of the SHF model. Also, the computation time and boundary treatment, the DO model was better than zone model and six heat flux model.

Key words: aerospace propulsion system; turbulent combustion; numerical simulation; radiative heat transfer; discrete-ordinates model

在工程燃烧设备中,火焰辐射传热是一种重要的传热方式,在许多燃烧现象中,甚至在总传热中占据绝对优势,对其进行准确的数值模拟有着

重要的意义。火焰的辐射传热与火焰中介质的温度以及介质的辐射吸收、散射能力有关,而介质的辐射和散射能力与辐射波长有关,因此,在进行模

收稿日期: 2005- 04- 28; 修订日期: 2005- 09- 28

作者简介: 李志强(1970-),男,山西长治人,北京航空航天大学能源与动力工程学院副教授,博士,航空发动机气动热力重点实验室,主要从事湍流与燃烧方面的研究。

型研究时必须全面考虑这些因素。目前对辐射传热进行数值研究的常用方法有简单的热流法 (Heat Flux method, 简称 HF)、较复杂的区域法 (Zone method, 简称 Z) 和离散传输法 (Discrete Transfer method, 简称 DT)、复杂的蒙特卡落法 (Monte-Carlo method, 简称 MC), 还有离散坐标法 (Discrete-Ordinates method, 简称 DO) 等^[1~3]。HF 法简单直观, 把复杂的微分-积分方程处理成单纯的通用微分方程, 易于和流场、浓度场耦合, 得到了广泛的工程应用, 其缺点是把空间的辐射积分近似地简化成只是沿二维或三维空间坐标轴方向的几个辐射热流, 使得模拟结果误差较大, 不利于对工程设计的指导; Z 法和 MC 法比较精确, 可用于检验其它模拟的准确性, 但其缺点是计算量太大, 很难在复杂工程问题中和湍流流动模型耦合; DT 法吸收了 Z 法和 MC 法的一些优点, 将辐射方向由随机抽样改为预先给定, 并且只在两个边界面跟踪计算能束的吸收情况, 然而对复杂的三维燃烧过程, 该方法的计算量仍比较大; DO 法是根据计算空间的结构特点将辐射传热离散成许多个方向, 每一方向对应一定的立体角, 能够弥补 HF 法仅把空间辐射简化为几个坐标轴方向的缺点, 目前该方法的使用还不够普遍、经验还不多, 但比较简单和计算结果比较精确的特点已经引起了工程技术人员的普遍关注。因此, 本文通过对 DO 模型的模拟能力进行研究, 并和 HF 法、Z 方法和实验数据进行对照, 考察其模拟燃烧辐射换热的可行性。

1 火焰辐射换热过程的基本方程与离散坐标模型

计算火焰传热过程所用的基本方程是能量方程, 即:

$$\nabla \cdot (\rho v c_p T) = \nabla \cdot (\Gamma_T \nabla T) + S_Q \quad (1)$$

式中, 等号左边项是焓 $c_p T$ 的流动项, 右边第一项是扩散项 (即导热项), 第二项是源项 S_Q 。 S_Q 包括化学反应释放热 Q 和辐射换热率 Q_R , 即:

$$S_Q = Q + Q_R =$$

$$W_s Q_s + k_a V \left(\sum_{m=1}^{n+2} I_m \omega_m - 4\sigma T^4 \right) \quad (2)$$

式中: W_s 是化学反应率; Q_s 为 s 组分的气相反应热; k_a 是介质的辐射吸收系数; I_m 表示火焰热辐射传热量; ω_m 是空间立体角; σ 是波耳慈曼常数; T 是温度; V 是燃烧室的体积。

火焰的热辐射换热与火焰中介质的温度以及介质的辐射吸收和散射的能力都有关系, 按照吸

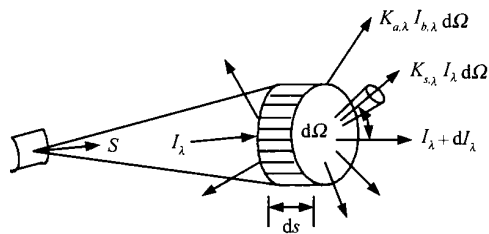


图1 沿 s 方向的辐射强度 I_λ 的变化率

Fig. 1 Change rate of radiation intensity I_λ along the s direction

收和散射介质辐射换热的基本原理, 介质中波长为 λ 辐射强度为 I_λ 的单色热辐射沿 s 方向传播时 (如图1), 在此方向的间距 ds 内辐射强度的变化率为^[4, 5]:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = - (K_{a,\lambda} + K_{s,\lambda}) I_\lambda + K_{a,\lambda} I_{b,\lambda} + \frac{K_{s,\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(s, \omega) \Phi(\lambda, \omega, \omega) d\omega \quad (3)$$

式中, s 为方向矢量; $K_{a,\lambda}$ 和 $K_{s,\lambda}$ 分别为介质在辐射波长 λ 下的单色吸收系数和散射系数; ω 为空间立体角; $I_{b,\lambda}$ 是在波长 λ 下的黑体单色辐射强度; $\Phi(\lambda, \omega, \omega)$ 为相函数, 表示散射的空间分布, 可近似表示为:

$$\Phi(\lambda, \omega, \omega) = \Phi_n' = \sum_{n=0}^M a_n p_n \cos \varphi \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \mu_m \mu_m' + \xi_m \xi_m' + \eta_m \eta_m' \quad (4)$$

方程(3)表示单色入射辐射强度 I_λ 在 s 方向上的空间立体角 $d\omega$ 中随传播距离 s 的变化, 其右边第一项是介质微元体吸收和散射引起的 I_λ 的减弱, 第二项是介质自身的容积辐射, 第三项是从周围射入微元体的辐射强度在 s 方向的散射。由于该方程呈现出典型的微分-积分性质, 导致求解非常复杂, 因此, 本文用 DO 法简化来对其进行求解。

DO 法由 Chandrasekhar S 首先提出, 并经 Carlson B G 和 Lathrop K D 加以发展完善, 随后一些研究人员把其用来模拟辐射换热的研究^[6~10]。其基本思想是将空间辐射传热离散为 m 个离散的方向, 每一个方向对应一定的立体角, 在此角度内, 辐射强度为定值。使用该方法后, 方程(3)在所有波长下积分后可写成如下形式:

$$\mu_m \frac{\partial I_m}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_m}{\partial y} + \eta_m \frac{\partial I_m}{\partial z} = - (K_a + K_s) I_m + K_a I_b + \frac{K_s}{4\pi} \sum_m \omega_m \Phi_{m,m} I_m' \quad (5)$$

式中: μ_m, ξ_m, η_m 和权 ω_m 的值受一定条件的约束, I_b 是在所有波长下的黑体辐射强度。

假设在微元体界面上和微元体中心的辐射强度间存在着一定的关系, 则所构成的特定空间格式为:

$$I_{m,p} = f_{m,j} I_{j-1} + (1 - f_{m,j}) I_j \quad (6)$$

不同的 $f_{m,j}$ 可以用不同的差分格式来表示^[11], 本文采用如下指数格式:

$$f_{m,x_j} = \frac{1}{1 - \exp(-\tau_{m,x_j})} - \frac{1}{\tau_{m,x_j}} \quad \tau_{m,x} = \frac{\beta_{m,p} \Delta x_j}{|\mu_m|} \quad (7)$$

将方程(6)在柱坐标系下离散, 可得如下形式:

$$I_{m,p} =$$

$$\frac{|\mu_m| A_i I_{m,if} y f_z + |\xi_m| [B_j + I_{m,if} x f_z + I_{m,if} x f_y f_z (B_j - B_{j+1})] + |\eta_m| C_k I_{m,kf} x f_y + Q_{ald}}{|\mu_m| A_i f_y f_z + |\xi_m| B_j + I_{m,if} x f_z + |\eta_m| C_k f_x f_y + f_x f_y f_z \alpha_{m+1/2} (f \omega_m) + \beta_{m,p} f_x f_y f_z V_p} \quad (8)$$

其中:

$$Q_{ald} = f_x f_y f_z [\alpha_{m+1/2} (1 - f) I_{m-1/2} + f \alpha_{m-1/2} I_{m-1/2}] / (f \omega_m) + S_{m,p} f_x f_y f_z V_p$$

$$\beta_{m,p}' = K_a + K_s - [K_s / (4\pi)] \omega_m \Phi_{m,m}'$$

$$S_{m,p} = K_a I_{b,p} + \frac{K_s}{4\pi} \sum_{m \neq m} \omega_m \Phi_{m,m} I_{m,p}'$$

除了 r, θ, z 三个方向的辐射外, 在周向还有附加辐射, 本文对其处理如下:

$$\alpha_{m+1/2} - \alpha_{m-1/2} = \omega_m \mu_m \quad \text{且} \quad \alpha_{1/2} = \alpha_{m+1/2} = 0$$

在进行数值计算时, 先确定一个方向作为初始方向, 在这个方向上, 周向辐射为零, 利用式:

$$I_{m,p} = f_{m,j} I_{j-1/2} + (1 - f_{m,j}) I_{j+1/2}$$

可以计算它相邻的附加辐射换热值。即:

$$I_{m,p} =$$

$$\frac{|\mu_m| A_i I_{m,if} y f_z + |\xi_m| I_{m,if} x f_z [(B_j + B_{j+1})/2] + |\eta_m| C_k I_{m,kf} x f_y + S_{m,p} f_x f_y f_z V_p}{|\mu_m| A_i f_y f_z + |\xi_m| f_x f_z [(B_j + B_{j+1})/2] + |\eta_m| C_k f_x f_y + \beta_{m,p}' f_x f_y f_z V_p} \quad (9)$$

将方程(9)所计算的附加辐射换热值代入差分方程(8), 依次求解, 即可得到各点的辐射强度值, 再代入能量方程(1)进行求解。

2 DO 模型的检验

为了验证 DO 模型计算燃烧辐射换热的可行性结果, 本文首先对一个经典矩形空间的三维纯辐射换热分别用前述简化的 DO 模型和 HF 法中的六通量模型(Six heat flux model, 简称 SHF)进行了模拟比较, 并和文献[12]中用区域法给出的较精确的模拟结果进行了比较。

对于气体燃料(如 CO 、 H_2 和低分子的碳氢燃料 CH_4 等)的燃烧, 火焰的热辐射主要靠三原子气体分子 CO_2 和 H_2O 等, 几乎没有炭黑粒、焦炭粒和灰粒的生成, 所以, 热辐射的散射可略去不计, 即 $K_s \approx 0$ 。

矩形空间的计算域尺寸、辐射换热物性参数和边界条件分别为:

$$\left. \begin{aligned} L_x &= 2 \text{ m}, \quad L_y = 2 \text{ m}, \quad L_z = 4 \text{ m} \\ K_a &= 0.5 \text{ m}^{-1}, \quad K_s = 0 \\ S &= 5.0 \text{ kW/m}^3 \\ z &= 0, \quad T = 1200 \text{ K}, \quad \epsilon = 0.85 \\ z &= L_z, \quad T = 400 \text{ K}, \quad \epsilon = 0.7 \\ x \text{ 向与 } y \text{ 向边界:} \\ T &= 900 \text{ K}, \quad \epsilon = 0.7 \end{aligned} \right\}$$

图2所示为该矩形空间内分别用 DO 模型、SHF 模型和 Z 方法所计算 $y = 1.0 \text{ m}$ 时3个不同高度($z = 0.4 \text{ m}$, 2.0 m 和 3.6 m)处沿 x 轴方向的温度分布。可以看出, 利用 DO 模型所计算的结果与较准确的 Z 方法所得的结果符合的很好, 能够比较合理地模拟出燃烧室内的辐射热温度分布趋势, 在着火区域的温度最高, 在出口区域的温度最低, 温差大约为150多度; 而用 SHF 模型计算所得的结果与之有较大的差异, 所得辐射热温度场分

布不合理,在整个燃烧室内的温度分布相差很小,大约只有十几度,几乎可以认为温度场是均匀的。究其原因在于两种模型所依据的物理思想,

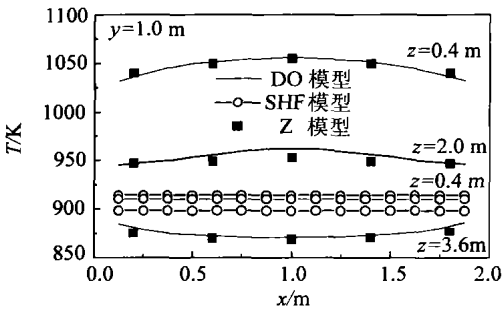


图2 DO 法、SHF 法和 Z 法的温度分布比较

Fig. 2 Comparison of temperature distribution using DO, SHF and Z methods

SHF 法的物理思想是把微元体界面上复杂的半球空间热辐射,简化为垂直于此界面的均匀辐射热流,即把空间的辐射积分近似简化为沿三维空间坐标轴方向的6个不进行空间积分的均匀辐射热流,从而割裂了各个方向之间的联系,同时把边界条件也简化为垂直于壁面的反射辐射能,造成了计算方程在简化原理上的不真实,大大低估了辐射传热。实际介质各微元界面上不仅有垂直于界面的辐射能射入,而且其它方向也有辐射能射入,辐射能量的大小均应按照方程3的介质中热辐射的吸收和散射原理变化,而不应该把半球空间辐射力简化为沿坐标轴方向的均匀辐射力,因此,用 SHF 模型求解能量方程必然会带来较大的误差,甚至完全不正确。而 DO 模型的基本思想是将空间辐射传热离散为 m 个离散的方向,每一个方向对应一定的立体角,在此角度内,辐射强度为定值,尽管在计算时也没有直接进行空间积分,但随着离散方向的增加,效果就越接近空间积分运算,同时考虑了各个方向之间的联系,因此,该模型充分考虑了辐射传热过程的实质,还能计及介质的吸收和散射系数在空间的变化,也能反映固体壁面的实际反射效果,计算结果比较接近实际情况。

在计算时间方面,采用 SHF 模型每步循环均需要求解辐射换热方程,收敛速度比较慢。而采用本文简化的 DO 模型后,由于每20步循环才求解一次辐射换热方程,并没有出现离散方向增多而带来计算量增加的缺陷,收敛速度反而比较快。可见,用 DO 模型来模拟辐射换热比较快速与准确,并且在计算时间和边界处理等方面比 Z 模型优越,在计算时间和计算精度方面比 SHF 模型优

越,应该得到广泛的应用。

3 DO 模型的应用

本文用所简化的 DO 辐射传热模型对甲烷-空气旋流燃烧进行了数值模拟,计算对象如图3所示,CH₄从中心管送入,流量为0.893 2 m³/h;空气从周围圆环送入,流量为8.9 m³/h;圆环中装有旋流叶片(如图4所示),旋流叶片的角度为30°;旋流数为0.43。数值计算时所采用的湍流模型为修正的 $k-\epsilon$ 模型,气相燃烧采用 EBU-Arrhenius 模型。各物理量在入口处取均匀流条件,给定进口速度,湍动能及其耗散率和各关联量。轴线上用对称条件,壁面处取无滑移条件,对近壁网格点用壁面函数近似。计算区域取为燃烧室的四分之一柱体,计算网格数为35×25×8,网格为交错网格。在求解差分方程时,气相采用 P-V 修正的 SIMPLE 算法,利用 TDMA 逐线、逐面迭代求解。对辐射传热采用逐点扫描的方法进行求解,计算中所选定的差分格式为指数格式。

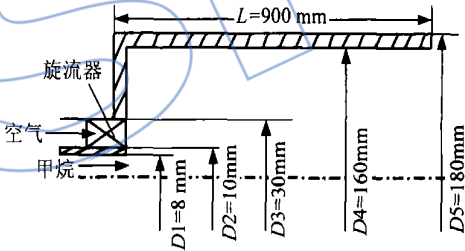


图3 旋流燃烧室几何形状及尺寸

Fig. 3 Configuration and sizes of the swirling combustor

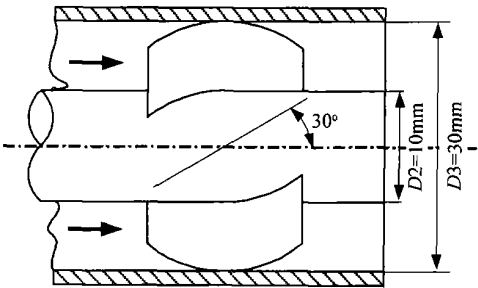


图4 旋流器的结构

Fig. 4 Configuration of swirler

其辐射换热的边界条件为:

$$I_m = \epsilon_w I_{bw} +$$

$$\frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \sum_{m, n, s \leq 0} \omega_h \cdot |\vec{n} \cdot \vec{s}| I_m \quad (10)$$

具体表示为如下形式:

$x=0$ 时:

$$I_m = \epsilon_w I_{bw} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \sum_{m, \mu_m' < 0} \omega_m' \cdot |\mu_m| I_m'$$

(11)

$x=L$ 时:

$$I_m = I_m' \quad (\mu_m = -\mu_m', \quad \xi_m = -\xi_m', \quad \eta_m = -\eta_m')$$

(12)

$r=0$ 时为反射条件, 即:

$$I_m = I_m', \quad \xi_m = \xi_m', \quad \xi_m > 0$$

(13)

$r=D/2$ 时:

$$I_m = \epsilon_w I_{bw} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \sum_{m, \xi_m > 0} \omega_m' \cdot |\xi_m| I_m'$$

(14)

$\theta=0$ 时为反射条件, 即:

$$I_m = I_m', \quad \eta_m = -\eta_m', \quad \eta_m > 0$$

(15)

$\theta=\pi/2$ 时为反射条件, 即:

$$I_m = I_m', \quad \eta_m = -\eta_m', \quad \eta_m < 0$$

(16)

图5给出了燃烧室内温度分布的等值线图, 可以看出边角回流区和中心回流区内温度较高,

SHF 模型的计算值比实验值偏低, 在壁面处有较大的偏差; DO 模型的计算值比实验值略高, 并且在壁面处也和实验值符合的较好。SHF 模型的计算值低于 DO 模型的原因在于 SHF 模型在物理本质上的不真实低估了燃烧室内的辐射换热, 同时对壁面热流的低估作用更大。另外, 两个模型的计算值相差不大的原因在于气相燃料的燃烧时, 辐射传热与对流传热相比, 所占的比例不大。若用于计算煤粉的燃烧时, 将会产生比较大的偏差。通过计算还发现, 使用 DO 模型后的计算量并没有增加, 反而比 SHF 模型有所减少。

4 结 论

本文对目前使用还不够普遍、经验还不多的模拟辐射传热的 DO 模型进行了验证与应用, 通过分析计算结果, 可以得出如下结论:

(1) DO 模型的计算结果与较准确的 Z 模型

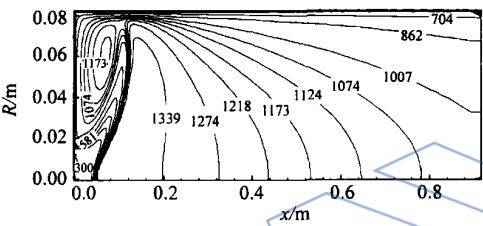


图5 温度分布图
Fig. 5 Temperature distribution

起着稳定火焰的作用, 而进口附近和近壁区的温度较低, 符合旋流燃烧的温度分布特性。图6为沿燃烧室轴向6个截面上的温度计算值与实验值的比较, 可以看出, DO 模型和SHF 模型的计算结果在定性上类似, 在定量上有一定的差异, 在大部分区域, 两者均和实验值符合的较好。总的看来,

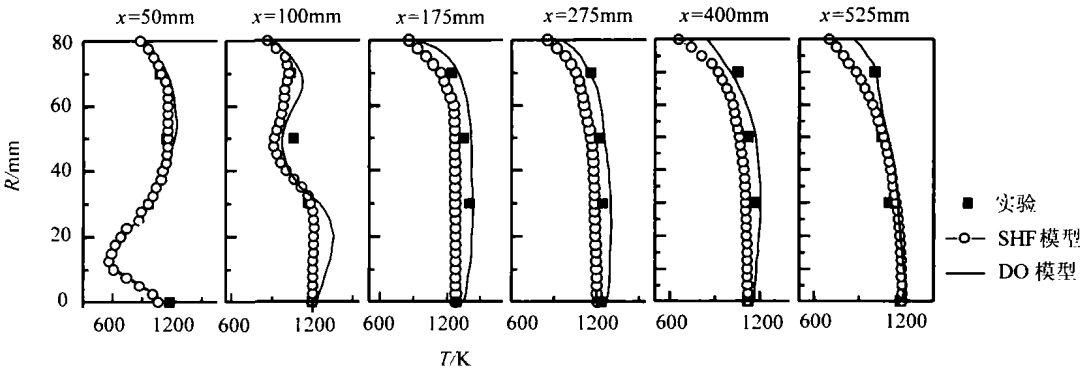


图6 各个截面上温度计算值和实验值的对比
Fig. 6 Temperature profiles

的计算结果符合很好,其准确度远远高于 SHF 模型的计算结果。而在计算时间和边界处理方面比 Z 模型优越,在计算时间和准确度方面比 SHF 模型优越。

(2) 应用 DO 模型来模拟甲烷-空气的旋流燃烧的辐射换热时,所给出的计算结果在整个计算区域内均和实验值符合的较好;而 SHF 模型却低估了辐射换热,并且在壁面处的低估作用非常明显。这表明 DO 模型能够比较准确地用来计算燃烧传热过程的辐射换热。

(3) 从边界处理、计算时间和计算准确度等多方面分析,DO 模型在计算燃烧传热过程的辐射换热方面比其它模型具有一定的优越性,应当对其加大研究力度,使其更好地应用于工程实践。

参考文献:

- [1] Knaus H, Schneider R, Han X, et al. Comparison of Different Radiative Heat Transfer Models and Their Applicability in Coal-Fired Utility Boiler Simulation [A]. 3rd International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment [C]. 1995.
- [2] 王应时, 范维澄, 周力行, 徐旭常. 燃烧过程数值计算 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1989.
- [3] 范维澄, 万跃鹏. 流动及燃烧的模式与计算 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992.
- [4] Sparrow E M, Cess R D. Radiative Heat Transfer [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1978.
- [5] 王补宣. 工程传热传质学 (上册) [M]. 北京: 科学技术出版社, 1982.
- [6] Chandrasekhar S. Radiative Transfer [M]. New York: Dover Publications Inc, 1960.
- [7] Carlson B G, Lathrop K D. Transport Theory—the Method of Discrete Ordinates [A]. Computing Methods in Reactor Physics [C]. New York: 1968.
- [8] Fiveland W A. Three-Dimensional Radiative Heat-Transfer Solutions by the Discrete-Ordinates Method [J]. J. Thermophysics, 1988, 2(4): 309~316.
- [9] Jamaluddin A S, Smith P J. Discrete-Ordinates Solution of Radiative Transfer Equation in Nonaxisymmetric Cylindrical Enclosures [J]. J. of Thermophysics and Heat Transfer, 1992, 6(2): 242~245.
- [10] Adams B R, Smith P J. Three-Dimensional Discrete-Ordinates Modeling of Radiative Transfer in a Geometrically Complex Furnace [J]. Combustion Science and Technology, 1993, 88: 293~308.
- [11] Chai J C, Lee H S, Patankar S V. Improved Treatment of Scattering Using the Discrete-Ordinates Method [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1994, 116: 260~263.
- [12] Menguc M P, Viskanta R. Radiative Transfer in Three-Dimensional Rectangular Enclosures Containing Inhomogeneous, Anisotropically Scattering Media [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1985, 33(6): 533~549.