

各向异性散射介质的辐射传热分析

(华中理工大学) 邢华伟 阮 剑 郑楚光

【摘要】 利用 Monte-Carlo、Zone 相结合的数值计算方法(简称 MCZ 方法)分析各向同性和各向异性散射介质的辐射换热。为了便于对照。本文选取了一维平板系统,利用所编程序对各向同性散射吸收介质和线性相函数各向异性纯散射介质的半球透射率和半球反射率以及线性相函数各向异性散射吸收介质的在平板中辐射传热分别进行了计算,获得了较好的结论。

关键词: 半球反射率; 半球透射率; MCZ 方法; 各向同性散射; 各向异性散射; 相函数

中图分类号: TK124

1 引言

对于一维辐射换热已有很多研究者进行过讨论,并运用了多种方法作了计算,如 DO 法^[1]、热流法^[2]等,对半球反射率和半球透射率的计算也有很多文献作了报导,文献[3]对各向同性散射介质的半球反射率和半球透射率作了分析计算,文献[4]对线性相函数下的各向异性散射介质的半球反射率和半球透射率作了分析计算,均可作为精确结果。本文作者利用 Monte Carlo 方法和 Zone 方法相结合的方法(MCZ 方法)对一维平板系统的半球反射率和半球透射率进行了计算,验证 MCZ 方法对散射问题处理的准确性,与文献[3]和[4]作了对比,同时计算了充满各向异性散射、吸收介质时的壁面辐射热流分布。

2 辐射传播方程

在本文中,一侧平板为透射表面($\tau=0$),辐射能量到另一不透射平板($\tau=\tau_d$),该平板通过反射与吸收参与辐射传热,忽略平板间介质的辐射,于是该辐射系统应满足下列传播方程及边界条件:

$$\mu \frac{\partial I(\tau, \mu)}{\partial \tau} + I(\tau, \mu) = \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 I(\tau, \mu) d\mu, 0 \leq \tau \leq \tau_d \quad (1)$$

$$I(0, \mu) = 1, \mu > 0 \quad (2a)$$

$$I(\tau_d, -\mu) = \rho^S I(\tau_d, \mu) + 2\rho^d \int_0^1 I(\tau_d, \mu) d\mu, \mu > 0 \quad (2b)$$

其中, I 是辐射强度, τ 是光学厚度变量, μ 是辐射角的方向余弦, ω 是散射率, $\tau_d = d \times (k_a + k_s)$ 是平板的光学厚度。对传播方程(1)进行数值求解可得辐射强度 $I(\tau, \mu)$, 于是可得平板的半球反射率为: $R = [2\pi \int_{-1}^1 I(0, -\mu) d\mu] / [2\pi \int_{-1}^1 \mu d\mu]$, 同样, 平板的半球透射率为:

$$T = [2\pi \int_{-1}^1 I(\tau_d, \mu) \mu d\mu] / [2\pi \int_0^1 \mu d\mu]$$

3 MCZ 方法原理及其对散射的处理

Zone 方法^[3]是一种古老的计算方法,其主要原理是将辐射空间划分为若干体积区和面积区,并假定任一区域的温度和辐射特性均匀一致。各区域直接与周围空间进行辐射换热,由此建立每个区域的由未知温度组成的方程组。区域数目增大到一定值时,Zone 方法可获得精确的结果。但 Zone 法在计算直接辐射交换面积时需计算多重积分,区域数目增大时使得计算模型太大,内存消耗过大,相应的计算时间就大大增加,同时难于处理实际参与辐射的介质的非均匀吸收和散射的问题,因此该方法受到限制。Monte-Carlo 方法^[6]是一种概率模拟方法,它可以方便地用于积分的求解,因此作者考虑对 Zone 方法中的直接交换面积采用 Monte-Carlo 方法进行计算,这样大大减少了计算时间,而且非均匀吸收和散射问题也可以方便地解决。

3.1 Monte-Carlo 法求直接辐射交换面积

收稿日期: 1998-02-27 收修改稿: 1998-07-20

作者简介: 邢华伟, (1972-), 男, 博士研究生, 武汉华中理工大学煤燃烧国家重点实验室(430074)

Monte-Carlo 法把系统内各体积区域和面积区域发射的能量分成 N 等分, 分别由 N 条光束(能束)携带, 通过随机选取能束的发射位置和发射方向, 然后对每条能束进行跟踪, 在经过另一个区域时被该区域吸收能量, 一直跟踪到能束能量被全部吸收为止, 即可获得它对所经各区域的辐射热量。跟踪完所有区域的所有能束后就获得了各区域之间的净换热量。

从直接辐射交换面积的概念可知, 在两个区域之间的辐射热交换表达式中, 当所有的壁面为黑体时, 壁面上就没有反射, 假设发射区域对应的黑体辐射能 σT^4 为 1.0, 其它区域的辐射能都为 0, 这时所求得的两区域间的热交换其实就是两区域之间的直接辐射交换面积。

则对某一发射体积 i 区域中的一条能束的初始发射能量可以设为 $P_n^0 = 4k_{a,gi}V_{gi}/N_{gi}$, 而对一发射面积区域 j , 则令一条能束的初始发射能量为: $P_n^0 = A_{s_j}/N_{s_j}$ 。能束通过各区域时能量被吸收, 能束能量不断衰减。若经过的某一体积区域 j 的吸收系数为 $k_{a,j}$, 在区域 j 中的真实光程为 L_j , 则在区域 j 内被吸收的能量可表示为: $\Delta P_n^j = P_n^0 - P_n^k = P_n^0 (1 - e^{-k_{a,j}L_j})$, 若把发射区域 i 的所有经过区域 j 的能束被区域 j 所吸收的能量用变量 PG^j 累加, 当完成对发射区域 i 的所有能束跟踪后, PG^j 的值就等于发射区域 i 与区域 j 的热交换量, 也即为它们之间的直接辐射交换面积。

穿过体积区域 j 后, 能束进入区域 k , 如果区域 k 是体积区的话, 则用 P_n^k 作为 P_n^0 的新值, 重复上述过程。如果区域 k 是黑体壁面, 则能束即被壁面全部吸收, 被吸收的能量用 PW^k 记忆并不断累加, 也可得到发射区域与此壁面区域之间的直接辐射交换面积。

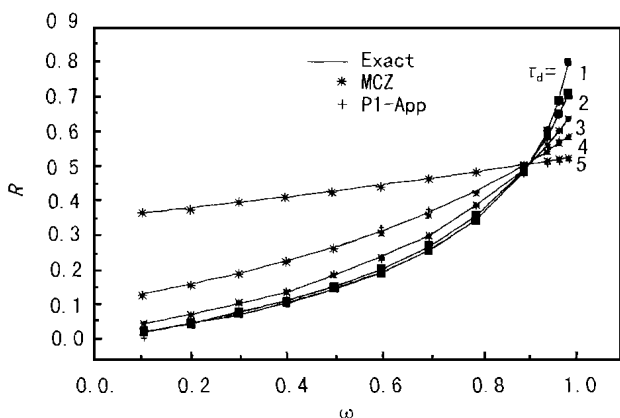


图 1 各相同性散射介质的半球反射率 ($\rho_d=0.5$)

3.2 对散射问题的处理

Monte-Carlo 法根据吸收来模拟能束发射力的不断衰减, 散射则被看作是与吸收同时进行的随机过程。首先确定能束所通过的区域 j 内的实际光程 L_j , 然后与散射的可能光程 $l_s = -\ln R_s/k_{s,j}$ ($k_{s,j}$ 是区域 j 的散射系数, R_s 是 $(0, 1)$ 间的随机数) 相比较。

如果 $L_j < l_s$, 认为能束穿过区域 j 而没被散射, 这种情况下用 L_j 来计算损失到该区域内的能量。此后能束进入下一区域内, 对其继续进行跟踪。

如果 $L_j > l_s$, 认为能束在区域 j 内穿行了路程 l_s 后被散射。在这种情况下, 用 l_s 来计算损失到该区域内的能量, 继续跟踪仍在区域 j 内但以新方向传播的该能束。散射后的传播方向通过相函数求得:

$$R_\alpha = [\int_0^\alpha f(\alpha)\sin\alpha d\alpha] / [\int_0^\pi f(\alpha)\sin\alpha d\alpha],$$

式中 α 就是相对于能束入射方向的随机散射角, $f(\alpha)$ 是散射角的分布函数, 即相函数, R_α 是区间 $(0, 1)$ 内的随机数。各向同性时相函数等于 1。本文采用的线性相函数表示为 $f(\alpha) = 1 + \cos\alpha$ 。

4 计算结果

本文对两种情况——各向同性散射和线性相函数各向异性散射的均匀介质的半球反射率和半球透射率作了计算, 介质吸收系数为 k_a , 散射系数为 k_s , 对前者计算了 $\rho_d=0.5$ 时的半球反射率和半球透射率, ρ_d 为在光学厚度 τ_d 处平板的反射系数, 计算时把平板划分为 20 个体积区域, 每个区域的能束数为 12000 条, 忽略介质的发射, 图 1、2 是对各向同性散射介质的计算结果, 横坐标表示散射率 $\omega = k_s / (k_a + k_s)$, 其中 Exact 和 P1-APP 的结果选自文献[3]。从图中也可以得出半球吸收率 $A = 1 - R - T$ 。

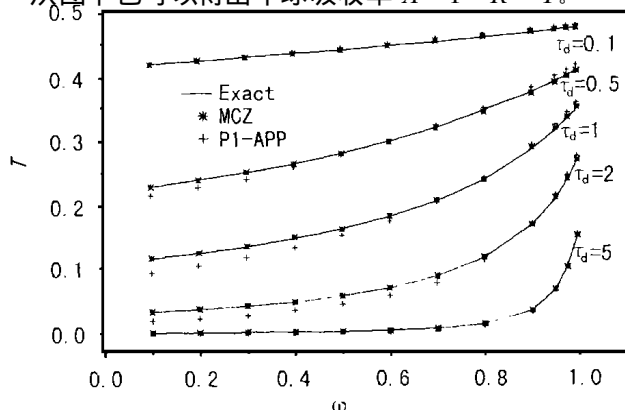


图 2 各向同性散射介质的半球透射率 ($\rho_d=0.5$)

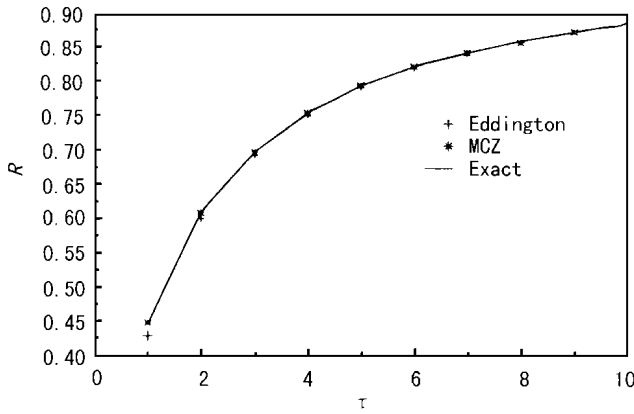


图 3 各向异性纯散射介质的半球反射率($x=0.5$)

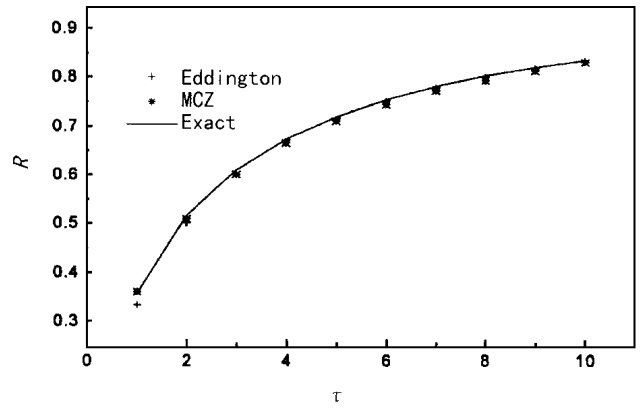


图 4 各向异性纯散射介质的半球反射率($x=1.0$)

对于各向异性散射, 作者分别计算了 $x=0.5$ 及 $x=1.0$ 时的线性相函数纯散射时的半球反射率 R , 计算结果见图 3、4 所示, 半球透射率 $T=1-R$ 。其中 Exact 和 P1APP 的结果选自文献[4]。

数各向异性散射时的无量纲辐射热流中, 与精确值也吻合得较好, 从结果可以看出, 当 $x=1$ (前向散射) 时的辐射热流比 $x=-1$ (后射散射) 要大, 且随光学厚度的增大更为显著, 这与实际物理本质是吻合的。

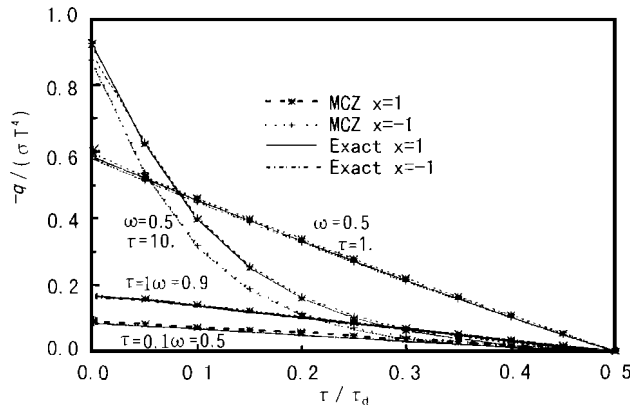


图 5 各向异性散射对辐射热流 $-q / \sigma T^4$ 的影响

从上述计算结果可以看出, MCZ 法对辐射传热计算有较高的精度, 同时它又有易于处理非均匀性辐射介质的特性, 且计算方便的特点, 因此可推广到多维情况。

参考文献

5 结论

本文对平板内的各向同性散射介质和各向异性散射介质的半球反射率和半球透射率进行了计算, 从计算结果可以看出具有很高的精确度, 与精确值的最大误差不超过 4%。通过与 P1 法及 Eddington 法的比较, 发现在各向同性散射计算中, 对半球反射率和半球透射率的计算, MCZ 法比两者都有更高的精度, 但在各向异性散射计算中, 当光学厚度较大时 ($\tau > 4$), 精确度比 Eddington 略差。在计算线性相函

- [1] Fiveland W A. Discrete ordinate methods for radiative heat transfer in isotropically and anisotropically scattering media. *ASME J Heat Transfer*, 1987, 109: 809 ~ 812.
- [2] Brewster M Q and Tien C L. Examination of the two-flux model for radiative transfer in particular system. *Int J Heat Mass Transfer*, 1982, 26(1): 101 ~ 107.
- [3] Liu C. C and Ozisk M N. Hemispherical reflectivity and transmissivity of an absorbing, isotropically scattering slab with a reflecting boundary. *Int J Heat Mass Transfer*, 1973 16: 685 ~ 690.
- [4] Busbridge I W and Orchard S E. Reflection and transmission of light by a thick atmosphere according to the phase function: $1 + x \cos \theta$. *Journal of Astrophysics*, 1967, 149: 655 ~ 644.
- [5] Hottel H C and Sarofim A. *Radiative transfer*. New York: McGraw-Hill 1967.
- [6] 孙昭星, 胡西一. 锅炉燃烧室辐射传热的 Monte Carlo 解法. *电机工程报*, 1984, 4: 67 ~ 70.
- [7] Adayan and Tien C L. Radiative transfer with anisotropic scattering in an isothermal slab. *J Quant Spectrosc Radiant Transfer*, Vol 16: 113 ~ 125.

(渠 源 编)

作者注: 各图坐标均为无量纲量, 没有单位。

observed when the blade spacing ratio has a variation interval of 2.5 ~ 3.0. **Key words:** pulverized coal concentrator, mound body, louver, resistance characteristics

火电厂水力输灰系统阻垢防垢研究 = **A Study of Scale Inhibition and Prevention for a Thermal Power Plant Wet-ash Transportation System** [刊, 中] / Chen Yafei, Gao Xiang, Fang Mengxiang, et al (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

Discussed in this paper are the scale prevention measures for an ash water transportation system and the scale inhibition mechanism of scale inhibiting agents. An experimental study of scale inhibition and prevention was conducted of a kind of utility boiler-fired coal with ash rich in CaO, addressing such a variety of topics as the scale characteristics and scale inhibition rate when scale inhibitors of various formulas are adopted, and the scale inhibition and prevention effectiveness when steel/rubber combination pipes and ash water precipitation tank are employed. A comparison analysis has also been performed with respect to different kinds of methods used. **Key words:** wet ash transportation, scale, scale inhibition and prevention

各向异性散射介质的辐射传热分析 = **An Analysis of Radiation Heat Transfer in Isotropically and Anisotropically Scattering Media** [刊, 中] / Xing Huawei, Ruan Jian, Zheng Chuguan (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

With the use of a combined Monte-Carlo and Zone method of numerical calculation (called MCZ method for short) an analysis was conducted of the radiation heat transfer in isotropically and anisotropically scattering media. For convenience of comparison an one-dimensional slab system is employed. With the help of specially prepared programs calculated respectively are the hemispherical reflectivity and transmissivity of isotropically scattering absorbing media and linear phase-function anisotropically pure scattering media as well as the radiation heat transfer in flat slabs of linear phase-function anisotropically scattering absorbing media. Fairly satisfactory conclusions were obtained. **Key words:** hemispherical reflectivity, hemispherical transmissivity, MCZ method, isotropical scattering, anisotropical scattering, phase function

用 PIV 测量法研究燃气轮机叶轮与导叶叶轮间的速度场 = **A Study of the Velocity Field Between a Gas Turbine Runner and Guide Vane Wheel with the Use of PIV Measurement Method** [刊, 中] / Zhao Yabin (Jiangsu Petrochemical Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

A test rig for the experimental research of fluid flow condition inside the cavity ahead of a gas turbine first stage blade wheel is described along with the test method and results. Particle imaging technology was employed to measure the velocity field inside the disk cavity. Analyzed is the effect of the magnitude of seal gas flow rate on the flow field at various locations. Also studied is the relationship between the critical parameters of main flow into the cavity and the flow field. **Key words:** gas turbine, experiment, PIV system

分配联箱气液两相流流型对垂直并联管分配特性的影响 = **The Effect of Gas/Liquid Two-phase Flow Pattern in a Distribution Header on the Distribution Characteristics of Vertical U-Junction Pipe System** [刊, 中] / Cheng Zhuoming, Zhou Yunlong (Northeast Power Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

A theoretical and experimental study was conducted of the flow distribution characteristics of low-mass flow in a vertical U-junction parallel-connected pipe system. Obtained were the distribution characteristics of gas phase and gas/liquid two-phase mass flow rate as well as the flow pattern record of various branch pipes. Also analyzed is the effect of flow pattern in distribution headers on the flow distribution and the flow pattern in various branch pipes. **Key words:** gas/liquid two-phase flow, parallel pipes, flow distribution

双调风燃烧器锅炉燃烧参数优化的试验研究 = **An Experimental Study on the Optimization of Combustion Parameters of a Dual Air-Register Burner Boiler** [刊, 中] / Hu Jianguo, Huang Yuming, et al (Zhejiang Provincial