



谈和平 易红亮 著

多层介质 红外热辐射传输



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

多层介质红外热辐射传输

谈和平 易红亮 著

国家杰出青年科学基金项目(59725617)

国家自然科学基金重点项目(50336010、50930007)

国家自然科学基金重大国际合作项目(50620120442)

国家自然科学基金面上项目(59486003、50806018)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地归纳、整理和总结了作者二十多年来在热辐射传递基准解及多层介质辐射传热等方面的研究工作,系统论述了作者提出的一种求解热辐射传递问题的基准算法——射线踪迹-节点分析法的基本原理,详细介绍了采用该方法研究各向异性散射介质、多层半透明介质、梯度折射率介质、半透明相变介质及矩形半透明介质内辐射传递及辐射-导热耦合传热的特性与规律。

本书可供工程热物理、红外技术物理以及航空航天、材料等相关学科从事热辐射模拟与应用的科研人员、工程技术人员,以及高等院校相关专业的研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

多层介质红外热辐射传输/谈和平,易红亮著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-034818-0

I. ①多… II. ①谈… ②易… III. ①红外辐射-热传导 IV. ①O434.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 124798 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:包志虹
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 9 月第一次印刷 印张:25 1/4

字数:480 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

工程中经常遇到的温度范围内,热辐射的能量主要集中在 $0.1\sim 1000\mu\text{m}$,可分为紫外、可见光和红外波段。真空中, $0.1\sim 0.38\mu\text{m}$ 为紫外波段, $0.38\sim 0.76\mu\text{m}$ 为可见光波段, $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ 为红外波段。上述分界线,并没有严格统一的规定。由此可见,热辐射涵盖的波段范围比红外辐射更广。

热辐射是热量传输三种方式(热传导、热对流、热辐射)之一,属传热学研究范畴。而紫外、可见光、红外波段作为电磁波的一部分,广泛用于遥测、通信领域,属光学研究范畴。近年来,随着工业发展,尤其在国防科技中出现很多伴随传热过程的信息传输问题,如红外目标特性、红外探测与遥感、红外成像制导等,需要将传热过程与红外传输过程结合起来。这两种传输过程的计算原理、方法基本一样。因此,在本书中,对“热辐射”、“红外辐射”和“光辐射”将不加区别。

辐射强度不仅是时间、空间位置的函数,也是波长、空间方向的函数,因此,描述半透明介质内热辐射强度变化的基本方程为微分-积分混合型的辐射传递方程。

辐射传热的边界条件不仅包括热边界条件,还需要考虑界面的光学(辐射)特性,即界面的透射特性(不透明、半透明)和反射特性(镜、漫反射)。例如,锅炉炉膛、燃烧室内的燃烧属不透明界面,森林火灾、导弹尾喷焰属半透明界面。由于热辐射的选择性,需要考虑界面的光谱特性;由于热辐射的延程性,当界面反射率不为零时,辐射边界条件中含有远程项;当界面为半透明且镜反射时,需考虑界面处的全反射效应。

由于上述原因,到目前为止,辐射传递方程仅在一维灰介质、不透明漫反射界面条件下有解析解,多数情况下只能通过数值计算的途径进行近似求解。随着高速计算机的发展和普及,数值模拟方法越来越受到重视,各种数值方法不断涌现和发展,数值计算已成为半透明介质内热辐射传递理论研究和工程应用的重要手段。

然而,如何判断某一辐射传递方程数值求解方法的可信度和计算精度?

一是通过实验结果来检验。迄今为止,有关热辐射的实验研究主要集中在辐射物性上。例如,金属和非金属表面半球发射率、方向半球反射率、表面双向反射率,气体的发射率、吸收系数、衰减系数,粒子的光学常数(复折射率)、粒子系的穿透率等。相对而言,有关热辐射传输的实验,文献报道很少,且主要集中在单纯的红外辐射传输,或热辐射与热传导耦合时的传输问题。其中的原因,以我们的理解,主要有以下几点:

(1) 除了在高真空下(宇宙空间或特定的实验条件),高温热辐射通常与流体流动、化学反应(燃烧)联系在一起。

(2) 湍流流动、湍流燃烧的理论分析与数值计算至今尚未很好地解决,数值计算与实验结果的对比尚存在较大的偏差。

(3) 如果上述两点能得到共识,则高温热辐射与湍流流动、湍流燃烧耦合后的实验结果很难用来单纯验证热辐射传输模型、热辐射传输数值计算的正确性与否。实验结果可以用来说明某种型号的燃烧器、发动机是否可以应用,也可以用于测定在该实验条件下某一光谱热辐射强度。但是用来验证热辐射传输模型与数值计算的前提是,湍流流动和湍流燃烧的理论模型与数值计算及其偏差估计正确。

二是与已有的并已得到验证的辐射传递方程数值求解方法的对比验证。由于辐射强度是空间方向的函数,而目前绝大多数的辐射传递方程数值求解方法是基于微分形式辐射传递方程的全局离散,如热流法、离散坐标法、有限体积法、有限元法等,均对空间方向进行了离散,因此不可避免地带来了离散辐射传递方向所产生的误差。因此,目前常被国内外文献用作数值求解比对验证的参考基准方法是区域法(zone method, ZM)和蒙特卡罗法(Monte-Carlo method, MCM)。

区域法不存在对空间立体角的离散,故用于求解热辐射传输问题的计算精度较高,通常可将其解作为验证其他数值方法的参考基准,以确定其他方法对空间立体角离散所带来的误差。然而,区域法目前尚不能有效处理诸如半透明且镜反射等复杂界面光学特性问题。

蒙特卡罗法是一种概率模拟方法,它的优点显著:适应性强,可以处理各种复杂问题,如多维、复杂几何形状、各向异性散射、各向异性发射等;在处理复杂问题时,MCM 模拟计算的复杂程度大体上随问题的复杂性成比例增加,而其他方法处理复杂问题时,其复杂程度大体上随问题的复杂性成平方增加。与区域法一样,MCM 也不存在对空间立体角的离散,因此通常也将其解作为一个验证的参考基准。影响 MCM 模拟精度的主要原因在于产生的伪随机数的优劣;尽管目前检验伪随机数的方法有许多种,但是这些检验方法绝大多数是必要的却并不充分。作为一种概率统计方法,MCM 不可避免地存在一定的统计误差,其计算结果总是在精确解周围波动,随着模拟抽样光束数量的增加逐渐接近精确解,但其前提是所采用的伪随机数序列分布均匀、充分独立、重复周期足够长。

此外,工程中常涉及多层介质内的辐射传热,如飞行器再入大气层气动加热时的多层隔热系统、多层热障涂层的传热问题、用于提高服装保暖性能的多层设计、空间光学窗口、多层薄膜的热分析等。又如,大气层是一个典型的非均匀热力系统,其上下界面均为半透明界面,因此,亦可将大气层内的辐射传输视为半透明界

面下一维多层含微粒各向异性散射介质内的热辐射传输问题。

有鉴于此,本课题组多年来一直在寻求发展一种可以担负辐射传输问题的基准解法(Benchmark),即“射线踪迹-节点分析法”。该基准解法应该涵盖各种光学界面、各种散射特性、多层非均匀介质等一维辐射传输系统中可能涉及的各种复杂物理问题,且能拓展到求解多维规则形状介质内的热辐射传递问题。

本书共 10 章。第 1 章论述了基于射线踪迹-节点分析法求解辐射传递及辐射与导热耦合传热问题的基本思想与基本原理、热辐射源项的推导以及各种光学界面下辐射传热边界条件。第 2 章介绍了单层吸收、各向同性散射性介质的辐射传递模型的推导、激光入射在单层半透明介质内引起的瞬态热响应及均匀介质在红外加热过程中的耦合传热分析。第 3 章和第 4 章分别导出了三层与 n 层吸收、各向同性散射性介质的辐射传递模型,并考察了其在多种光学界面条件下的辐射-导热耦合传热。第 5 章和第 6 章分别论述了单层、复合层吸收与各向异性散射性介质的辐射传递模型的推导,阐述了各向异性散射能量重新分配原理,分析了各向异性散射介质内的耦合传热现象。第 7 章提出了一种射线混合跟踪法,导出了多种光学界面条件下介质层两表面具有不同反射特性时的辐射传递模型。第 8 章采用第 4 章建立的多层辐射传递模型,分析了梯度折射率介质层内的辐射传递及瞬态耦合传热。第 9 章建立了一种求解矩形半透明介质辐射传递的二维射线踪迹-节点分析法模型,分别研究了黑体界面及具有一个半透明漫反射界面条件下的瞬态耦合传热。第 10 章介绍了多层半透明介质耦合传热在空间液滴辐射散热、空间光学窗口热分析及半透明介质相变过程中的应用。附录部分给出了几种光学界面下辐射传递系数的推导、界面辐射能量传递函数的求解以及线性化方程组系数的确定。

本书的第 1~4 章由谈和平教授撰写,第 5 章由谈和平教授与易红亮博士共同撰写,第 6、7、8、10 章及附录由易红亮博士撰写,第 9 章由国防科学技术大学罗剑峰博士撰写,全书最后由谈和平统合定稿。

二十多年来,我们在热辐射特性与传递方面的研究工作,始终得到国家自然科学基金委的大力支持。本项研究,先后得到国家杰出青年科学基金项目(59725617)、国家自然科学基金重点项目(50336010、50930007)、国家自然科学基金重大国际合作项目(50620120442)、国家自然科学基金面上项目(59486003、50806018)的资助。此外,本研究工作还得到国家 973 计划课题(2009CB220006)、国家教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0067)、航天科技创新基金(2000051908)及哈尔滨工业大学研究生主干课程建设项目的资助,在此表示衷心的感谢。

本书是我们在归纳、总结已发表的研究论文的基础上完成的一本学术专著,主

要介绍作者提出并发展起来的一种新型基准算法体系,并用于求解各种光学界面条件下,多层、多维吸收、散射性介质内热辐射传递及辐射与导热耦合传热。由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不当之处,希望读者和同行专家提出宝贵的意见与建议,以便有机会再版时扩充和修订。我们的电子信箱是 tanheping@hit.edu.cn, yihongliang@hit.edu.cn。

谈和平

2012年2月于哈尔滨工业大学

符 号 表

缩 写

BOP 不透明光谱区, opaque band

BRDF 双向反射分布函数, bidirectional reflectance distribution function, 它是波长、入射角、反射角和温度的函数, $[\text{sr}^{-1}]$

BST 半透明光谱区, semitransparent band

BTDF 双向透射分布函数, bidirectional Transmittance distribution function, 它是波长、入射角、反射角和温度的函数, $[\text{sr}^{-1}]$

DOM 离散坐标法, discrete ordinate method

DTM 离散传递法, discrete transfer method

FDM 有限差分法, finite difference method

FEM 有限元法, finite element method

FVM 有限体积法, finite volume method

LBM 格子玻尔兹曼方法, lattice Boltzmann method

MCM 蒙特卡罗法, Monte-Carlo method

RTC 辐射传递系数, radiative transfer coefficient, 如 $(V_i V_j)$ 、 $[V_i V_j]$ 等

RTE 辐射传递方程, radiative transfer equation

RTNAM, RTM 射线踪迹-节点分析法, ray tracing nodal analyzing method, 简称“射线踪迹法”, ray tracing method

STM 半透明介质, semi-transparent material

英文符号

A 面积, $[\text{m}^2]$

$a = k/(\rho c)$, 热扩散率, $[\text{m}^2/\text{s}]$

a_1 、 a_2 分别为线性和非线性各向异性散射系数

$B_{k,T} = \int_{\Delta\lambda_k} E_{\text{lk}}(T) d\lambda / \int_0^\infty E_{\text{lk}}(T) d\lambda$, T 下 $\Delta\lambda_k$ 谱带内的黑体辐射能占总辐射能的份额, $[-]$

$C = c\rho$, 单位体积热容, $[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$

C_1, C_2 分别为复合层介质第一、二层的单位体积热容, $[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$

c 比热容, $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

D 直径, 相变介质的厚度, $[\text{m}]$

E 两层辐射强度(或辐射能量)份额传递函数

E_3 $n=3$ 的指数积分函数, $E_n(x) = \int_0^1 e^{-x/\mu} \mu^{n-2} d\mu, (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$

E_b 黑体辐射力, $[\text{W}/\text{m}^2]$

$E_\lambda, E_{b\lambda}$ 分别为光谱辐射力、黑体光谱辐射力, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})]$ 或 $[\text{W}/\text{m}^3]$

E 入射照度, $[\text{W}/\text{m}^2]$

EPS0 控制散射份额的精度要求

EPS1 控制温度场两次迭代之间的精度要求

EPS2 控制非稳态温度场前后两个时间步的精度要求

EPS3 非灰体参数 $B_{k,T}$ 的计算控制精度

EPS4、EPS5 分别为单重高斯积分、两重高斯积分的控制精度

F 单层辐射强度(或辐射能量)份额传递函数

$(F_{-}\Phi_i^{\text{ext}})^{\text{BST}}, (B_{-}\Phi_i^{\text{ext}})^{\text{BST}}$ 分别为激光前向、后向入射控制体 i 产生的辐射内能增量

FV 控制体对本身的直接交换面积, $=4\kappa_e \Delta x - 2[1 - 2E_3(\kappa_e \Delta x)]$

FV_1, FV_2 分别为复合层第一、二层介质控制体对本身的直接交换面积

FV_i 控制体 V_i 对 V_i 的直接交换面积, $=4\kappa_{e,i} \Delta x - 2[1 - 2E_3(\kappa_{e,i} \Delta x)]$

$F^*(z), F^h(z), F^q(z)$ 分别为两侧表面均不透明时的吸收性、后向散射、前向散射辐射传递函数(5.2.1小节)

$F(x), F^h(x), F^q(x)$ 分别为吸收性、后向散射、前向散射衰减因子(第7章)

$FT^*(z), FR^*(z)$ 两侧表面均半透明时的吸收性辐射传递函数(5.2.2小节)

$FD^q(z), FD^h(z)$ 两侧表面均半透明时的直接散射辐射传递函数(5.2.2小节)

$FR^q(z), FR^h(z)$ 两侧表面均半透明时, 经一次反射的散射辐射传递函数(5.2.2小节)

$FRR^q(z), FRR^h(z)$ 两侧表面均半透明时, 经二次反射的散射辐射传递函数(5.2.2小节)

f_l 液相率

$f(x, \theta)$ 吸收性衰减函数(第7章)

$f^h(x, \theta), f^q(x, \theta)$ 分别为后向散射、前向散射衰减函数

$f_{A,k}^B$ 辐射能量传递函数, 表示体元 A 在谱带 k 向整个半球空间发射的辐射能量被体元 B 衰减(或者到达体元 B)的部分

$f_{V_{(l,m)}^{n' \rightarrow n}, k}^{V_{(i,j)}}$ 界面辐射能量传递函数, 为控制体 $V_{(l,m)}$ 的内界面 n' 在谱带 k 发射的、穿过外界面 n 被控制体 $V_{(i,j)}$ “衰减”的部分

$f_{V_{(l,m)}^n}^{V_{(i,j)}}$ 界面辐射能量传递函数, 为控制体 $V_{(l,m)}$ 的界面 n 向外发射的辐射能量被 $V_{(i,j)}$ “衰减”的部分

H 多层辐射强度(或辐射能量)份额传递函数

H 对流-辐射参数, $=h/\sigma T_r^3$, $[-]$

H_x, H_y 分别为矩形介质的长和宽

h 对流换热系数, $[W/(m^2 \cdot K)]$; 介质的总焓, $[J/kg]$

I, I_λ 辐射强度, $[W/(m^2 \cdot sr)]$; 光谱辐射强度, $[W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)]$

k 吸收指数, $[-]$ [第 1 章, 式(1.2)]

k, k_i 分别为介质的导热系数、介质第 i 个控制体的导热系数, $[W/(m \cdot K)]$

k_1, k_2 分别为复合层第一、二层介质的导热系数, $[W/(m \cdot K)]$

k_{ie}, k_{iw} 第 i 个控制体的调和平均导热系数, $[W/(m \cdot K)]$

L 介质的厚度, 多层介质的总厚度, $[m]$; 相变潜热, $[J/kg]$

L_1, L_2 分别为复合层第一、二层介质的厚度, $[m]$

M_b 谱带模型中, 介质与表面的辐射特性随波长变化划分的总谱带数

M_i 控制体(内节点)的总数

m 微小粒子的复折射率(光学常数), $=n-ik$, $[-]$

N, N_i $k/(4L\sigma T_r^3), k_i/(4L_i\sigma T_r^3)$, 导热-辐射参数, 第 i 层介质的导热-辐射参数, $[-]$

N_{cv1}, N_{cv2} 分别为复合层第一、二层介质的控制体数

n 复合层的第 n 个子层

$n, n(X)$ 分别为单折射率(折射指数)、折射率分布函数, $[-]$

n_1, n_2 分别为复合层第一、二层介质的折射率

$n_{k,i}$ $\Delta\lambda_k$ 谱带内(第 k 个谱带)介质第 i 个控制体的折射率, $[-]$

P 复合层介质的交界面

$P_{\text{refl}} = (\rho_1^s + \rho_2^s)/(\rho_1^s + \rho_1^d + \rho_2^s + \rho_2^d)$, 镜反射所占的份额

Q 复合层介质的交界面

Q_a, Q_e, Q_s 分别为粒子的吸收因子、衰减因子、散射因子, $[-]$

$q^{\text{cd}}, q^{\text{cv}}, q^r, q^t$ 分别为导热、对流、辐射和总的热流密度, $[W/m^2]$

q^* 无量纲热流密度, $=q/(\sigma T_r^4)$ 或按照参考文献中规定的定义, $[-]$

q_{la} 外界点热源(如激光)的投射辐射热流密度, $[W/m^2]$

q_{net}^r 净辐射热流密度, $[\text{W}/\text{m}^2]$

S_1, S_2 两侧表面

S_u, S_v 若两侧表面均半透明, $u, v = -\infty$ 或 $+\infty$; 若两侧表面均不透明, $u, v = 1$ 或 2 ; 若左侧表面半透明、右侧表面不透明 $u, v = -\infty$ 或 2

s 辐射传递行程, $[\text{m}]$

T, T_0, T_r 温度、初始温度、参考温度, $[\text{K}]$

T_{g1}, T_{g2} 介质两侧的环境(气体)温度, $[\text{K}]$

t 时间, $[\text{s}]$

t_{la} 外界激光入射持续时间, $[\text{s}]$

$t^*(\delta) = \text{Fo}(\delta) = at/\delta^2$

$t^* = 4\sigma T_r^3 t / (C_i L)$, C_i 相同时无因次时间才有意义

t_s^* 无因次稳态时间

Δt 时间步长, $[\text{s}]$

Δt^* 无因次时间步长, $4\sigma T_r^3 \Delta t / (C_i L)$, C_i 相同时无因次时间步长才有意义

V 体元, 体积, $[\text{m}^3]$

$V_i \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 直接到达 V_j

$V_i \rightarrow S_1 \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 先到达 S_1 , 再到达 V_j

$V_i \rightarrow S_2 \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 先到达 S_2 , 再到达 V_j

$V_i \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 先到达 S_1 , 再到达 S_2 , 最后到达 V_j

$V_i \rightarrow P \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 先到达 P , 再到达 V_j (6.2 节)

$V_i \rightarrow P \rightarrow S_1 \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 先到达 P , 再到达 S_1 , 最后到达 V_j (6.2 节)

$V_i \rightarrow P \rightarrow S_2 \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 先到达 P , 再到达 S_2 , 最后到达 V_j (6.2 节)

$V_i \rightarrow S_1 \rightarrow P \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 先到达 S_1 , 再到达 P , 最后到达 V_j (6.2 节)

$V_i \rightarrow S_2 \rightarrow P \rightarrow V_j$ 辐射强度从 V_i 先到达 S_2 , 再到达 P , 最后到达 V_j (6.2 节)

$(S_u S_v)_k, (S_u V_j)_k, (V_i V_j)_k$ 考虑吸收与发射, 但未考虑散射时的辐射传递系数

$[S_u S_v]_k, [S_u V_j]_k, [V_i V_j]_k$ 考虑吸收、发射、散射时的辐射传递系数

$(V_i V_j)_k^i, (V_i V_j)_k^b, (S_u V_j)_k^i, (S_u V_j)_k^b$ 方向入射辐射传递系数

$(V_i V_j)_k^{ff}, (V_i V_j)_k^{fb}, (V_i V_j)_k^{bf}, (V_i V_j)_k^{bb}$ 方向散射辐射传递系数, 第一个上标

$(V_i V_j)_k^{ft}, (V_i V_j)_k^{bt}, (V_i S_v)_k^{ft}, (V_i S_v)_k^{bt}$

表示对第一个控制体的入射方向, 第二个上标表示对第二个控制体(面元或体元)的入射方向

$(V_{(i,m)} V_{(i,j)})_k$ 对应于二维半透明介质, 考虑吸收与发射, 但未考虑散射时的体元对体元的 RTC

$[V_{(l,m)}V_{(i,j)}]_k$ 对应于二维半透明介质,考虑吸收、发射、散射时的体元对体元的 RTC

$(S_{1,m}V_{(i,j)})_k, (S_{2,m}V_{(i,j)})_k, (S_{3,m}V_{(i,j)})_k, (S_{4,m}V_{(i,j)})_k$ 对应于二维半透明介质,考虑吸收与发射,但未考虑散射时的面对体元的 RTC

$[S_{1,m}V_{(i,j)}]_k, [S_{2,m}V_{(i,j)}]_k, [S_{3,m}V_{(i,j)}]_k, [S_{4,m}V_{(i,j)}]_k$ 对应于二维半透明介质,考虑吸收、发射、散射时的面对体元的 RTC

X 无量纲坐标, x/L

x 垂直于介质层的坐标, $[m]$

x_a^b 表面或界面 a 和 b 间的距离, $[m]$, 7.2 节

$\Delta x_i = L_i/M_i$, 第 i 个控制体的厚度, $[m]$

x_i, y_i, z_i, w_i 等比较级数,用来跟踪辐射强度或辐射能量的传递

希腊符号

α 吸收率或吸收比, $[-]$

$\beta_1^{s,d}$ 等比较级数的公比, $\beta_1^{s,d} = \rho_1 \rho_2 F(2L)$; 适用于两侧表面均不透明,左侧表面镜反射、右侧表面漫反射

β_i 等比较级数的公比

β, β_1, β_2 单层介质、复合层第一、二层介质的等比较级数的公比,第 3、4、6、7 章

β_{12}, β_{21} 热辐射从第一层(第二层)介质入射第二层(第一层)介质并在复合层中传递时的无穷等比较级数的公比

β_{ij} 求解梯度折射率非均匀介质辐射传递系数($V_i V_j$)的等比较级数的公比

Γ 辐射强度传递份额,式(3.3)、式(4.25), $[-]$

Γ_1, Γ_2 辐射强度路径传递份额函数, $[-]$

γ 透射率或透射比,穿透率或穿透比, $[-]$

$\gamma(\theta)_{ij}$ 从介质层 i 入射介质层 j 时 θ 方向的透射率, $1 - \rho(\theta)_{ij}$, $[-]$

δ $\delta = L/2$, $[m]$

$(\delta x)_{ie}, (\delta x)_{iw}$ 分别为节点 i 和 $i+1$ 以及节点 i 和 $i-1$ 间的距离, $[m]$

$\epsilon, \epsilon_\lambda, \epsilon_k$ 发射率(吸收率)、光谱发射率(光谱吸收率)、谱带发射率(谱带吸收率), $[-]$

ζ $\zeta = M_i/\tau_0$, 每单位光学厚度所取的网格数, $[-]$

η 方向余弦, $[-]$

$\eta, \eta_{i,k}$ $\eta = 1 - \omega, \eta_{i,k} = 1 - \omega_{i,k}$

$\Theta = \frac{T - T_{r_1}}{T_{r_2} - T_{r_1}}$, 无因次温度

$\Theta_n^a(\theta), \Theta_n^b(\theta)$ 第 n 层介质前向散射、后向散射能量分配函数

θ 天顶角、维度角, rad 或 ($^\circ$)

$\theta, \theta_r, \theta_s, \theta_t, \theta_c$ 入射角、反射角、散射角、折射角、全反射临界角, rad 或 ($^\circ$)

θ_{ij} 从介质层 i 入射介质层 j 时产生的折射角, $i, j=0$ 时, 表示环境, rad 或 ($^\circ$)

θ 过余温度, $=T(t)-T_o$, [K]

$\kappa_a, \kappa_e, \kappa_s$ 介质的吸收系数、衰减系数、散射系数, [m^{-1}] 或 [cm^{-1}]

$\kappa_{a,k}, \kappa_{a,b,k}$ 介质、介质第 b 层的谱带吸收系数, [m^{-1}] 或 [cm^{-1}]

$\kappa_{e,k}, \kappa_{e,b,k}$ 介质、介质第 b 层的谱带衰减系数, $\kappa_{e,k} = \kappa_{a,k} + \kappa_{s,k}$, [m^{-1}] 或 [cm^{-1}]

$\kappa_{s,k}, \kappa_{s,b,k}$ 介质、介质第 b 层的谱带散射系数, [m^{-1}] 或 [cm^{-1}]

λ 波长, [μm]

$\mu, \mu_c = \cos\theta, = \cos\theta_c$

ρ 密度, [kg/m^3]

$\rho, \rho_k, \rho(\theta)_{ij}$ 反射率、谱带反射率、从介质层 i 入射介质层 j 时 θ 方向的反射率, [-]

σ Stefan-Boltzmann 常数, $=5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$

τ, τ_o $\tau = \kappa_e x, \tau_o = \kappa_e L$, 光学厚度, [-]

Φ, Φ_1, Φ_2 介质、复合层第一、二层介质的各向异性散射相函数

$\Phi_{\lambda,p}$ 单个粒子的光谱散射相函数

$\Phi_i^f, \Phi_i^{f,\text{ext}}, \Phi_i^{f,\text{int}}$ 控制体 i 的辐射热源项、辐射外热源、辐射内热源

$\Phi_{(i,j)}^f$ 矩形介质控制体 (i,j) 的辐射热源项

$\Phi_{S_1}^{f,\text{ext}}, \Phi_{S_2}^{f,\text{ext}}$ 分别为 S_1, S_2 的辐射外热源

$\Phi_{S_{-\infty}}^{f,\text{ext}}, \Phi_{S_{+\infty}}^{f,\text{ext}}$ 分别为外界环境 $S_{-\infty}, S_{+\infty}$ 的辐射外热源

ϕ 内热源

φ 方位角、圆周角, rad 或 ($^\circ$)

$\omega = \frac{\kappa_s}{\kappa_a + \kappa_s}$, 散射反照率、消光系数, [-]

$\omega_{\lambda,p}$ 单个粒子的光谱散射反照率

$\omega_i, \omega_1, \omega_2$ 控制体 i 、复合层介质第一、二层的散射反照率, [-]

下 标

0 参考值, 或在真空中, 或在长度 $=0$ 处

1, 2 介质 1 或 2, 位置 1 或 2, 界面 1 或 2

$-\infty, +\infty$ 与左右两侧环境 $S_{-\infty}$ 和 $S_{+\infty}$ 有关的参数

//, $\perp$ 平行和垂直偏振分量

A、a	吸收或辐射传递系数表示的能量传递份额中被吸收的部分
b	第 b 层介质, $b=1\sim n$
e	衰减;控制体 i 的东边界
g	界面外侧相邻介质(气体)
i、 i	入射、射入,第 i 个控制体
in、out	面向介质、面向环境的表面侧
ie、iw	交界面 ie(结点 i 和 $i+1$ 之间)、iw(结点 $i-1$ 和 i 之间)处的参数
k	谱带 $\Delta\lambda_k$,第 k 个谱带
la	平行光投射辐射
l	液相
m	介质
o	外侧(面向环境的表面侧)
o-o	介质层(单层或多层)两侧表面均不透明
r	反射(θ_r)
rf	环境参数、参考参数
S_1 、 S_2	与表面 S_1 和 S_2 有关的参数
s	路径或表面;散射,散射方向,或能量传递份额中被散射的部分;试样;固相
t	总的控制体数,或总厚度
t-o	介质层(单层或 n 层)左侧表面半透明,右侧表面不透明
t-t	介质层(单层或 n 层)两侧表面均为半透明
w	壁面,控制体 i 的西边界
λ	光谱(波长)
ρ	反射

上 标

(1)、(2)、(3)、(4) 辐射传递路径

* 归一化的值

b、f 后向(沿 x 轴负向)入射、前向(沿 x 轴正向)入射

BOP 不透明光谱区

BST 半透明光谱区

cd、cv、r、t 导热、对流、辐射和总热流

d 漫反射

d+s 表面反射的能量中既含漫反射份额,又含镜反射份额

ext,int 分别表示外部和内部

h,q 后向(沿 x 轴负向)散射、前向(沿 x 轴正向)散射

$m, m+1$ 非稳态问题的时层

n, nf 某一时层第 n 次迭代、最后一次迭代

s 镜反射

s-d 左侧表面镜反射、右侧表面漫反射

无因次参数

$Bi(\delta)$ 毕渥数, $=h\delta/k$

$Fo(\delta)$ 傅里叶数, $=at/\delta^2$

N 普朗特数, 导热-辐射参数, $=k/(4Ln^2\sigma T^3)$

N_{10} 按第 2 章文献[10]定义的导热-辐射参数, $=\kappa_a k/(4n^2\sigma T_H^3)$

q_{10}^{*r} 按第 2 章文献[10]定义的无因次辐射热流密度, $=q^r/(4n^2\sigma T_H^4)$

Θ_{10} 按第 2 章文献[10]定义的无因次温度, $=T/T_H$

目 录

前言

符号表

第 1 章 半透明介质层辐射与导热耦合传热	1
1.1 半透明介质和自然状态界面	1
1.2 热辐射光谱特性的处理	3
1.2.1 灰体、灰介质	3
1.2.2 平均当量参数法	3
1.2.3 谱带近似法(谱带模型)	3
1.3 射线踪迹-节点分析法简介	5
1.4 辐射与导热耦合传热能量方程	7
1.5 辐射热源项	8
1.5.1 表面 S_1 、 S_2 均半透明	8
1.5.2 表面 S_1 、 S_2 均不透明	10
1.5.3 表面 S_1 半透明、表面 S_2 不透明	11
1.6 表面辐射热流密度	12
1.6.1 表面 S_1 、 S_2 均半透明	12
1.6.2 表面 S_1 、 S_2 均不透明	13
1.6.3 表面 S_1 半透明、表面 S_2 不透明	13
1.7 热辐射边界条件	14
1.7.1 折射率与全反射	14
1.7.2 界面光学特性	15
1.7.3 热边界条件	15
1.8 射线踪迹-节点分析法研究进展	17
参考文献	18
第 2 章 单层各向同性散射介质内的辐射传热	22
2.1 单层吸收、发射性介质的辐射传递系数	22
2.2 单层吸收、发射、各向同性散射介质的辐射传递系数	24
2.2.1 计算散射时的能量平衡	25
2.2.2 考虑 n 次散射	26
2.2.3 数值计算方法	28

2.3	辐射传递系数的完整性检验	29
2.4	单层半透明介质内的辐射传热	31
2.4.1	玻璃平板冷却过程分析	31
2.4.2	航天飞机重返大气层时舷窗的瞬态加热	32
2.4.3	不透明界面下给定边界温度的瞬态耦合传热	33
2.4.4	部分漫反射、部分镜反射表面的辐射传递	34
2.5	脉冲激光引起的瞬态热效应	37
2.5.1	边界条件	39
2.5.2	激光入射在吸收、发射性介质内产生的辐射外热源	40
2.5.3	激光入射在吸收、发射、各向同性散射介质内产生的辐射外热源	41
2.5.4	激光入射的数值模拟和温度响应	44
2.6	红外加热过程中均匀介质内部温度场分析	48
2.6.1	物理模型	49
2.6.2	半透明界面下介质物性对内部温度分布的影响	50
2.6.3	半透明界面下边界条件对介质内部温度分布的影响	51
2.7	本章小结	52
	参考文献	53
第3章	三层各向同性散射介质内的辐射传热	56
3.1	引言	56
3.2	物理模型简介	57
3.3	两层介质辐射强度和辐射能量的传递模型	58
3.3.1	镜反射模型	59
3.3.2	漫反射模型	60
3.4	辐射传递系数	60
3.4.1	镜反射辐射传递系数的推导	61
3.4.2	镜反射率的确定	62
3.4.3	漫反射率的确定	66
3.4.4	全反射对辐射强度份额传递函数的影响	66
3.4.5	镜反射辐射传递系数的求解	69
3.4.6	漫反射下辐射传递系数的相对性和完整性	70
3.4.7	漫反射辐射传递系数的推导	71
3.5	三层模型的检验	72
3.6	两侧表面均半透明镜反射下三层介质耦合换热	73
3.6.1	真空隔离层对耦合换热的影响	73
3.6.2	非均匀辐射物性对温度分布的影响	75