

文章编号:1001-9014(2005)01-0049-04

# 各向异性散射梯度折射率介质层的热发射特性

黄勇<sup>1</sup>, 梁新刚<sup>1</sup>, 夏新林<sup>2</sup>, 谈和平<sup>2</sup>

(1. 清华大学工程力学系传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**将蒙特卡罗法和弯曲光线跟踪技术相结合,研究了各向异性散射性梯度折射率半透明介质层的发射特性. 介质层具有镜反射半透明表面和漫射基底面. 重点分析了散射反照率和散射相函数对介质层表观方向发射率和表观半球发射率的影响. 结果表明对于线性折射率分布的介质层,当散射较为强烈时,表观半球发射率可随介质层光学厚度增大而减小,这种现象与以往研究的半透明介质的情况有显著的不同.

**关键词:**热光学;发射特性;梯度折射率;半透明介质

**中图分类号:**TK124;O435 **文献标识码:**A

## THERMAL EMISSION CHARACTERISTICS OF AN ANISOTROPIC SCATTERING MEDIUM LAYER WITH GRADIENT INDEX

HUANG Yong<sup>1</sup>, LIANG Xin-Gang<sup>1</sup>, XIA Xin-Lin<sup>2</sup>, TAN He-Ping<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Key Laboratory of

Enhanced Heat transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, Beijing 100084, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** By combined the Monte Carlo method and curved ray tracing technique, the thermal emission characteristics of an anisotropic scattering semitransparent medium with gradient refractive index was analyzed. The semitransparent and specular emerging surface of the medium layer was parallel to an opaque and diffuse substrate wall. The influence of the scattering albedo and scattering phase function to the apparent emittance was investigated. The results show that the influence of the scattering to the apparent emission characteristics is important. In the medium with linear refractive index distribution, when strong scattering happens, the apparent emission will reduce with the increasing of the optical thickness of the medium. This phenomenon is quite different from that in conventional semitransparent bodies.

**Key words:** thermo-optics; emission characteristics; gradient index; semitransparent medium

### 引言

近几年,半透明介质的辐射传递研究,出现了考虑折射率随空间坐标连续变化或随温度变化的辐射传递问题的报道<sup>[1-3]</sup>. 这项研究主要有如下3点研究背景. 首先,近年来梯度折射率材料的兴起和不断发展,对于热环境下梯度折射率材料的热分析有重要意义. 加强该研究对于促进梯度折射率材料研制有积极意义. 其次,在国防、航天和一般工业中涉及到强激光、热等离子体和燃烧或一些其它的复杂多变的高温环境,常有伴随热现象的梯度折射率效应发生. 对于此类问题,考虑梯度折射率效应对辐射传

递的影响是得到正确研究结果的重要环节. 此外,在天体物理学上,恒星大气的辐射传递常要考虑变折射率的影响<sup>[4]</sup>.

在均匀折射率或多层均匀折射率介质内,辐射能沿直线传递. 而梯度折射率介质内辐射能沿弯曲路径传递,并在介质内部有全反射现象发生. 这些特点使得研究时需要传统的计算方法加以改进或对研究的模型进行近似处理. 蒙特卡罗法是辐射传递领域一种传统方法,它计算灵活,容易处理复杂界面和各向异性散射的情况,发展梯度折射率介质内辐射传递的蒙特卡罗法求解有重要意义. Siegel 和 Howell 曾指出,在梯度折射率介质内,如果考虑能束

收稿日期:2004-03-20,修回日期:2004-09-23

Received date: 2004-03-20, revised date: 2004-09-23

基金项目:国家自然科学基金(50476029),中国博士后科学基金资助项目(中博基 2003.03)

作者简介:黄勇(1974-),男,江西东乡人,清华大学工程力学系博士后,博士,研究方向:辐射换热,复合换热.

沿弯曲路径传输,采用蒙特卡罗法求解介质内的辐射传递问题从原则上是可行的<sup>[5]</sup>.

目前的研究多为一维、非散射性介质的情况,对梯度折射率介质的辐射特性、辐射传递规律的认识相当缺乏.文中以各向异性散射性梯度折射率半透明介质层为研究对象,将蒙特卡罗法模拟与弯曲光线跟踪技术相结合研究其表现发射,考察相关参数对表现发射率的影响.进一步发展蒙特卡罗法对该类问题的求解,同时获得散射性梯度折射率介质辐射特性的初步认识.

## 1 物理模型及求解过程

本文研究的物理模型如图 1 所示.吸收、发射、散射性半透明无限大灰介质平板.界面 1 是半透明镜反射,反射遵循 Fresnel 定律,不考虑偏振效应;界面 2 是不透明漫反射、漫发射基底面,发射率为  $\varepsilon_w$ .介质内折射率分布为  $n(z)$ ,介质的衰减系数为  $K$ .介质散射相函数为  $\Phi = 1 + b\cos\theta$ ,散射反照率为  $\omega$ .介质内温度分布为  $T(z)$ .外部环境折射率为 1.

散射性梯度折射率介质内的辐射传递方程为

$$\frac{d}{ds} \left[ \frac{I(s, \Omega)}{n^2(s)} \right] + K \frac{I(s, \Omega)}{n^2(s)} = (1 - \omega) K I_b(T) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\Omega, \Omega') \frac{I(s, \Omega')}{n^2(s)} d\Omega' \quad (1)$$

式(1)中  $s$  是沿光线传递弯曲路径的曲线坐标,  $\Omega$  是沿弯曲传递路径上某点的切线方向,  $I_b(T)$  是温度为  $T$  的黑体辐射强度.

采用蒙特卡罗法,积分微分方程式(1)可通过一系列随机过程模拟求解.这些过程包括介质或基底面能束的发射及方向选取、能束在介质内的行程长度、介质内的散射和散射方向的选取、表面的反射和折射、基底面的反射和吸收等等.

能束传递的弯曲路径求解可参考文献[1,2].

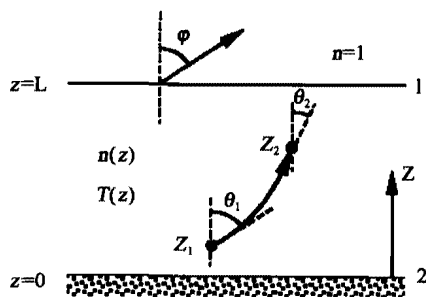


图 1 物理模型和坐标系

Fig. 1 Physical model and coordinate system

对于散射相函数为  $\Phi = 1 + b\cos\theta$  的介质,当  $b = 0, \pm 1$  时,散射天顶角方向分别为

$$\theta = \begin{cases} \arccos(1 - 2\sqrt{R_\theta}) & b = -1 \\ \arccos(1 - 2R_\theta) & b = 0 \\ \arccos(2\sqrt{R_\theta} - 1) & b = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中  $R_\theta$  是  $(0, 1)$  之间的随机数.上述  $b$  的 3 种取值,代表 3 种典型的散射特性.  $b = 0$  时,介质为各向同性散射;  $b = -1$  时,后向散射较为强烈;  $b = 1$  时,前向散射较为强烈.

模拟时介质发射的辐射能的能束按位置均匀选取,介质所发射总的能束数目为  $N_1$ .介质发射每根能束的辐射能量  $W_1$  与位置  $z$  有关,

$$W_1(z) = 4KL(1 - \omega)n^2(z)\sigma T^4(z)/N_1 \quad (3)$$

基底发射的总的能束数目为  $N_2$ ,基底发射每根能束的辐射能量  $W_2$  为

$$W_2 = n^2(0)\varepsilon_w\sigma T^4(0)/N_2 \quad (4)$$

从能束的辐射能量计算式可以看出,它们和发射点处单位体积的介质或单位面积的壁面发射功率成正比.而这种发射功率是与当地折射率的平方成正比.

设  $NM(\varphi)$ 、 $NW(\varphi)$  分别是介质和基底面通过界面 1 以角度  $\varphi$  射出、 $d\varphi$  角度范围内的能束数;  $NM$ 、 $NW$  分别是介质和基底面发射的能束从界面 1 射出的总数.则介质层的表现方向发射率  $\varepsilon(\varphi)$  和表现半球发射率  $\varepsilon$  分别为

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\sum_i^{NM(\varphi)} W_1(z_i) + NW(\varphi) \cdot W_2}{2\sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi \cdot \sigma T^4(L)}$$

$$\varepsilon = \frac{\sum_i^{NM(\varphi)} W_1(z_i) + NW \cdot W_2}{\sigma T^4(L)} \quad (5)$$

## 2 计算结果与讨论

以介质折射率线性分布为例,计算分析半透明介质层的表现方向发射率和表现半球发射率,考虑折射率线性分布的情况,表面处介质折射率为  $n_L$ ,基底处介质折射率为  $n_0$ .介质内温度为均匀分布或线性分布.本文不讨论基底面发射率的影响,所有计算基底面的发射率  $\varepsilon_w$  均取为 0.7.

### 2.1 表现方向发射率

图 2 是等温介质层表现方向发射率的计算结果.图 2a、2b 分别是光学厚度  $KL$  为 1 和 5 时,两种不同折射率分布和不同散射反照率时的计算结果.可以看出,非散射性介质的情况( $\omega = 0$ ),相比散射

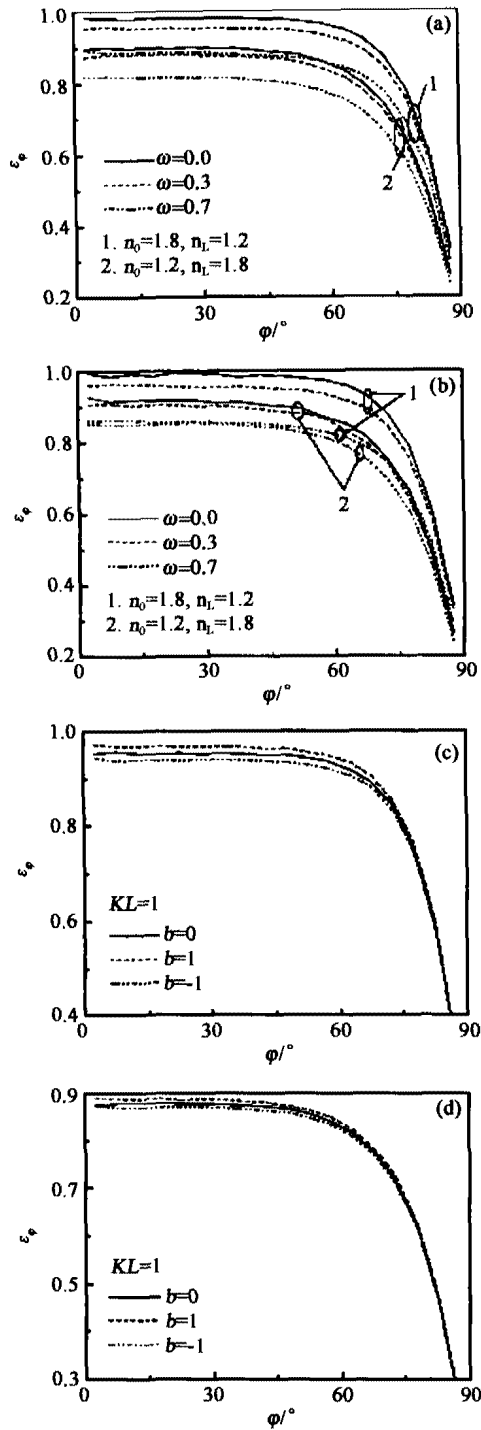


图2 表观方向发射率  
 Fig.2 Apparent directional emissivity  
 (a)  $b=0, KL=1$ ; (b)  $b=0, KL=5$ ;  
 (c)  $n_0=1.8, n_L=1.2$ ; (d)  $n_0=1.2, n_L=1.8$

性介质的情况,介质层的发射较大;而存在散射时,散射较强的情况( $\omega=0.7$ )比散射较弱( $\omega=0.3$ )的情况,介质层的表观发射更小.这是因为散射的增强,增大了辐射能束在介质内传输的概率,从而被介质和基底面吸收的概率增大,导致表观发射减小.计

算结果还表明折射率的分布对介质层发射特性的影响也较大.

图2c、2d是KL为1时,散射的方向性对表观发射的影响.图2c、2d是两种相反折射率分布的情况.从计算结果可以看出,相比各向同性散射的情况,前向散射较为强烈时介质层的表观方向发射率较大,而后向散射较为强烈时介质层的表观发射率较小.但这种影响较折射率分布的影响和散射反照率的影响而言较小.前向散射较为强烈意味着更多的能束散射后保持原来的传输方向,或与原传输方向偏移角度较小.非散射性介质可以看作一种极限情况下的前向散射,即散射方向为原传输方向.前向散射越强烈,其辐射特性与非散射性介质的情况越接近.

### 2.2 表观半球发射率

图3是介质层表观半球发射率的计算结果,其中图3a~3c是等温介质层的情况,图3d是介质层内温度为线性分布的情况.

图3a是非散射介质( $\omega=0.0$ )的表观半球发射率与各向同性散射性( $\omega=0.3, 0.7$ )介质表观半球发射率的比较.从计算结果可以看到,介质的散射较为强烈时( $\omega=0.7$ ),当线性折射率分布满足 $n_0 > n_L$  ( $n_0=1.8, n_L=1.2$ )的情况,介质层的表观半球发射率随着光学厚度KL的增大而减小.这与散射性均匀折射率介质层和非散射性梯度折射率介质层的情况是不同的.同样的结果在图3b中也可看到.

等温介质中,介质或基底面所发射能束辐射能量的大小与发射点处折射率的平方成正比.对于 $n_0 > n_L$ 的线性折射率分布介质层,远离表面发射点的能束能量较大,靠近表面发射点的能束能量较小,散射增大可以增加远离发射点处所发射能束射出表面的机会.如果跟踪的能束数目一定,介质层的光学厚度增大每个能束的能量增加,表观发射会增大;但同时光学厚度增大又增大了远离表面处所发射能束被介质吸收的机会,导致光学厚度增加到一定情况介质层的表观半球发射率随光学厚度的增加而减小.对于散射性均匀折射率的等温介质层,介质各处发射本领一致;而非散射的梯度折射率介质层的情况,能束的传递严格遵循一定的轨迹,则不存在上述问题,它们的表观发射严格地随光学厚度增加而增加.

图3b、3c是不同散射相函数对表观半球发射率的影响.与表观方向发射率的计算结果类似,相比各向同性散射的情况,前向散射强烈时介质层的表观半球发射率较大,而后向散射强烈时介质层的表观半球发射率较小.从图3b还可看出,与各向同性散

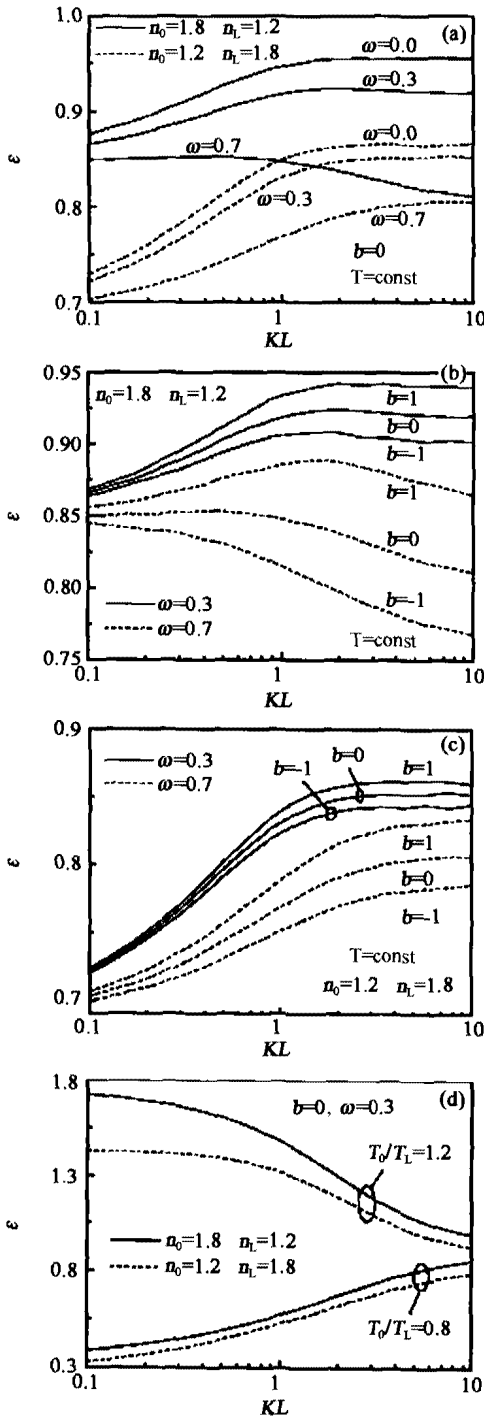


图3 表观半球发射率  
Fig. 3 Apparent hemisphere emissivity

射性介质相比,前向散射强烈时,随光学厚度  $KL$  增加表观半球发射率减小被推迟了。

图3d是线性温度分布时介质层的表观半球发射率计算结果.由于本文定义的表观发射率是介质层半球辐射力与温度为表面温度黑体辐射力的比

值,所以对温度分布  $T_0 > T_L$  的情况出现表观半球发射率大于1.当介质层的光学厚度逐渐增大时,对表观发射起决定作用的是表面处的折射率和温度。

### 3 结论

本文通过将蒙特卡罗法和弯曲光线跟踪技术相结合,研究了散射性梯度折射率半透明介质层的热发射特性,进一步发展了蒙特卡罗法对梯度折射率介质辐射传递的求解,同时得到散射性梯度折射率介质辐射特性的一些初步认识:

1. 散射对介质层的表观发射影响较大.当散射较为强烈,线性折射率分布为  $n_0 > n_L$  的情况时,介质层的表观半球发射率可随介质层光学厚度的增大而减小,这与非散射性梯度折射率介质层的发射特性和散射性均匀折射率介质层的发射特性有本质的区别;

2. 散射的方向性对介质层的表观发射有一定影响.相比各向同性散射的情况,前向散射强烈时介质层的表观发射较大,后向散射强烈时介质层的表观发射较小;

3. 介质内部的温度分布对表观发射也有重要的影响,但当光学厚度逐渐增大时,表面处的折射率和温度是影响表观发射的最主要因素。

### REFERENCES

- [1] Ben Abdallah P, Le Dez V. Thermal emission of a semi-transparent slab with variable spatial refractive index [J]. *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2000, **67**(3): 185—198.
- [2] XIA Xin-Lin, HUANG Yong, TAN He-Ping. Radiative transfer inside a linearly graded index semi-transparent slab: gray substrate wall and specular semi-transparent surface [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves* (夏新林, 黄勇, 谈和平. 灰壁面与镜反射界面下线性折射率半透明平板内的辐射传递. *红外与毫米波学报*). 2002, **21**(3): 185—188.
- [3] HUANG Yong, LIANG Xin-Gang, XIA Xin-Lin, et al. The influence of gradient index to the temperature field of semi-transparent medium [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves* (黄勇, 梁新刚, 夏新林, 谈和平. 梯度折射率对半透明介质温度场的影响. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3): 217—220.
- [4] Kowalski P M, Saumon D. Radiative transfer in the refractive atmospheres of very cool white dwarfs [J]. *Astrophysical Journal*, 2004, **607**(2): 970—981.
- [5] Siegel R, Howell J R. *Thermal Radiation Heat Transfer 2<sup>nd</sup> edition* [M]. Hemisphere and McGraw-Hill: Washington, 1981.