

梯度折射率半透明等温介质层的 表观发射特性*

黄 勇 谈和平 夏新林

(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 将伪光源迭加法与光线分裂跟踪算法相结合, 通过模拟计算介质的内部发射和辐射传递, 研究了梯度折射率 (GRIN) 半透明介质层的表观发射特性, 考虑折射率为线性分布的情况, 计算分析了等温情况下不同参数介质层的表观方向发射率和半球发射率, 并比较分析了离散层数对计算结果的影响。

关键词 半透明介质, 梯度折射率, 发射特性, 伪光源迭加法, 光线分裂跟踪技术。

APPARENT EMITTING CHARACTERISTICS OF SEMI-TRANSPARENT ISOTHERMAL MEDIUM LAYER WITH GRADED INDEX*

HUANG Yong TAN He-Ping XIA Xin-Lin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract By simulating the inside thermal emission of the medium and the radiation transfer process, the apparent emitting characteristics of a semi-transparent medium layer with graded index (GRIN) was investigated. The pseudo-source adding method was combined with the ray splitting and tracing technique in simulation. When constant and linearly distributed refractive indexes were considered for an isothermal layer, the apparent directional and hemispherical emissivities were both presented and analyzed for different parameters. In addition, the influence of the discrete sub-layer number on the calculating was discussed. The results show that the graded refractive index may considerably affect the apparent emission of a semi-transparent medium layer.

Key words semi-transparent medium, graded refractive index, emitting characteristics, pseudo-source adding method, ray splitting and tracing technique.

引言

半透明介质内的辐射传递及其表观发射光谱在目标红外特性、遥感探测、红外加热、耐热涂层以及玻璃加工和太阳能利用等工程领域有重要的应用背景。在折射率均匀分布的半透明介质表观发射方面, 文献[1]提出了一种伪光源迭加法, 并得出了平板状半透明介质层表观光谱发射的解析表达式, 文献[2]研究了表面正弦状弯曲的半透明介质层的表观光谱发射, 提出了光线分裂技术用于跟踪表面处的反射、折射辐射能、对层间介质折射率发生阶跃变化的两

层或多层半透明介质内的辐射传递, 一些学者也进行了研究^[3-5]。

由于非均匀性和热效应等原因, 会造成介质的梯度折射率分布。近年来, 介质的梯度折射率效应对光学窗口传递特性的影响以及在光学元件设计和加工技术中的应用已受到重视^[6,7]。但梯度折射率效应对半透明介质表观光谱发射特性的影响尚无研究。本文将伪光源迭加法与光线分裂跟踪算法相结合, 通过模拟计算半透明介质层的内部发射和辐射传递过程, 分析折射率线性分布时半透明介质层的表观发射特性。

* 国家自然科学基金(编号 50076010), 国家杰出青年基金(编号 59725617)资助项目

稿件收到日期 2000-11-29, 修改稿收到日期 2001-02-28

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50076010) and the Chinese National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 59725617)

Received 2000-11-29, revised 2001-02-28

1 物理模型及计算方法

1.1 物理模型

考虑一平板状半透明介质层,如图1所示. 界面1为半透明镜反射表面,界面2为不透明漫射基底面,介质层内温度分布为 $T(x)$. 对某一波长 λ 的辐射能,介质层沿 x 方向的光学厚度为 D ,其折射率分布为 $n(x)$,漫射面的反射率为 ρ_w ,发射率为 ϵ_w . 介质内辐射传递方程为

$$\frac{dI(x,\zeta)}{dx} + I(x,\zeta) = I_b(x), \quad (1)$$

其中 $I(x,\zeta)$ 是介质内光学厚度 x 处沿 ζ 角方向的光谱辐射强度, $I_b(x)$ 是介质层内与 x 处温度相同的黑体光谱辐射强度,辐射强度均为相对真空中的辐射强度,辐射能在介质层界面处的反射和折射分别遵循 Fresnel 反射定律和 Snell 折射定律.

1.2 伪光源迭加法

从界面1射出的辐射能是介质发射的辐射能和基底面2发射的辐射能经过介质的吸收、表面的反射、折射和基底面2的反射、吸收作用的结果. 其中由于介质梯度折射率的影响,光线在介质中传递时将发生弯曲.

介质层本身发射的辐射能一部分直接射出界面1,将其记为第一部分. 介质层本身发射的辐射能另一部分落到基底面2上,这部分辐射能经过基底面反射后与基底面自身的发射混合在一起,类似于一个光源发射的能量,称其为一次伪光源. 一次伪光源经过半透明介质层传递后,有部分能量返回基底面2,反射后又类似于一个光源的发射,称其为二次伪光源. 以此类推,在基底面上形成无穷多个伪光源发射,而两次伪光源之间有相同的过程衰减系数. 将所有的伪光源迭加起来,它通过半透明介质层的发射能量记为第二部分. 这样,两部分发射能量之和,即是介质层和基底面综合作用下通过界面1所发射出

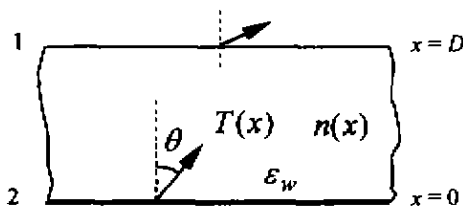


图1 物理模型
Fig. 1 Physical model

的辐射能.

1.3 辐射传递过程的光线分裂跟踪算法

由于介质的梯度折射率效应,在辐射能的传递过程中,能束射线发生弯曲. 本文采取对介质进行离散化处理来数值模拟辐射能的传递过程. 首先,将半透明介质层离散为 N 个微层,假设每个微层内介质折射率为定值,微层界面为镜反射半透明面. 辐射能束在微层面处发生反射和折射,分裂为反射光线和折射光线,如图2所示. 跟踪每层介质发射的沿某一方向的能束射线及其分裂产生的一系列反射光线和折射光线的传递过程,最终可获得其过程衰减系数或射出介质界面1的光谱辐射强度. 如果发生全反射,则只需要跟踪反射光线. 在3种情况下结束对能束传递及分裂过程的跟踪: (1) 光线穿过表面1, (2) 光线射到基底面2, (3) 光线的辐射强度对于我们所关心的部分影响已经足够小.

在对某一能束进行光线分裂跟踪时,光线向下分裂的层数未知,如果分裂 m 层,则最多可能有 2^m 条分裂光线. 采用图2所示的跟踪顺序,设定一些一维数组,将分裂前的数据存储在数组的某层,将分裂后需要跟踪的某条光线的数据存储在数组的下一层. 这样,尽管分裂层数不确定,分裂的光线数目繁多,但只需要一些一维数组即可保证计算需要.

1.4 一次伪光源的计算

基底面2上一次伪光源的发射强度 I_1 可表示为

$$I_1 = \epsilon_w I_b(0) + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \int_{\Omega=2\pi} I_1^*(0) \cos\theta d\Omega, \quad (2)$$

式中 $I_1^*(0)$ 是介质层本身发射并直接投射到基底面某方向光谱辐射强度,括弧中的0表示分裂层数,而非 x 方向坐标. 反向跟踪该方向的光线,即可求出其值. 跟踪时辐射强度满足如下传递关系:

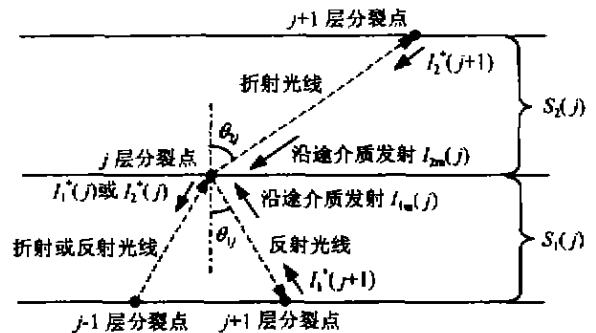


图2 光线分裂跟踪示意图
Fig. 2 Schematic diagram of ray splitting and tracing

$$I^-(j) = \begin{cases} I_{1w}(j) + I_1^-(j+1)\exp\left\{\left[-S_1(j)/\cos\theta_{1j}\right]\right\} \\ \left[-S_1(j)/\cos\theta_{1j}\right] \end{cases} \rho(j) + \begin{cases} I_{2m}(j) + I_2^-(j+1)\exp\left\{\left[-S_2(j)/\cos\theta_{2j}\right]\right\} \\ \left[-S_2(j)/\cos\theta_{2j}\right] \end{cases} (1 - \rho(j)), \quad (j = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

$$I_2^+(j) = \begin{cases} I_{1m}(j) + I_1^+(j-1)\exp\left\{\left[-S_1(j)/\cos\theta_{1j}\right]\right\} \\ \left[-S_1(j)/\cos\theta_{1j}\right] \end{cases} \rho(j) - \begin{cases} I_{2m}(j) + I_2^+(j-1)\exp\left\{\left[-S_2(j)/\cos\theta_{2j}\right]\right\} \\ \left[-S_2(j)/\cos\theta_{2j}\right] \end{cases} (1 - \rho(j)), \quad (j = 2, 3, 4, \dots) \quad (4)$$

$$I_1^+(0) = I_{1w}(0) + I_1^+(1)\exp[S_1(0)/\cos\theta], \quad (5)$$

其中 $I_1^-(j)$ 、 $I_2^-(j)$ 为第 j 层分裂点处分裂前反向光线的光谱辐射强度，下标 1 表示该光线是上一层分裂后的反射光线，下标 2 表示该光线是上一层分裂后的折射光线； $S_1(j)$ 、 $S_2(j)$ 是第 j 层分裂后，反射光线和折射光线所在的微层的厚度； θ_{1j} 、 θ_{2j} 分别是反射光线和折射光线与 x 轴的夹角； $\rho(j)$ 是第 j 层分裂处的反射率； $I_{1m}(j)$ 、 $I_{2m}(j)$ 是从第 $j+1$ 层分裂点到第 j 层分裂点的沿程介质发射在第 j 层分裂点处的光谱辐射强度，其值由式(6)和(7)确定。

$$I_{1m} = \int_{x(j+1)/\cos\theta_{1j}}^{x(j)/\cos\theta_{1j}} I_{1e}(x)\exp\left\{\frac{-[x(j) - x]}{\cos\theta_{1j}}\right\} dx, \quad (i = 1, 2, x(j) > x(j+1)) \quad (6)$$

$$I_{2m} = \int_{x(j)/\cos\theta_{2j}}^{x(j+1)/\cos\theta_{2j}} I_{2e}(x)\exp\left\{\frac{-[x(j+1) - x]}{\cos\theta_{2j}}\right\} dx, \quad (i = 1, 2, x(j) > x(j-1)) \quad (7)$$

式中 $x(j)$ 为第 j 层分裂点处的坐标，在跟踪结束点处，取 $I_1^-(j+1)$ 或 $I_2^-(j+1)$ 等于 0。

1.5 过程衰减系数的计算

离开基底面的每一能束均会有部分能量重新回到基底面，定义过程衰减系数 K 为

$$K = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega=2\pi} R \cos\theta d\Omega, \quad (8)$$

式中 R 为沿某角度 θ 离开基底面的辐射能中重新回到基底的份额，可知落回的角度也是 θ 角，有

$$R = \sum R_i(m_i), \quad (9)$$

这里 $R_i(m_i)$ 为落回基底的第 i 条分裂光线所占份额，它是经过 m_i 层分裂后产生的，其衰减传递规律由式(10)~(12)计算。

$$R_i(j) = R_i(j-1)\exp[-S_1(j)/\cos\theta_{1j}]\rho(j), \quad (10)$$

$$R_i(j) = R_i(j-1)\exp$$

$$[-S_2(j)/\cos\theta_{2j}][1 - \rho(j)], \quad (11)$$

$$R_i(0) = \exp[-S_1(0)/\cos\theta], \quad (12)$$

式(10)和(11)分别是 j 层分裂后沿反射方向和折射方向跟踪的传递衰减关系。

1.6 表现发射计算

与一次伪光源的计算类似，对表现发射表面 1 的某一出射方向，采用反向跟踪计算，可得到该方向的表现光谱辐射。反射跟踪时，沿程辐射的传递关系仍满足式(3)和式(4)，且按同样的 3 种条件结束跟踪过程。分裂光线射出表面 1 时，取 $I_1^-(j+1)$ 或 $I_2^-(j+1)$ 等于 0；分裂光线射到基底面 2 时，取 $I_1^+(j+1)$ 或 $I_2^+(j+1)$ 等于迭加伪光源的辐射强度。迭加伪光源的辐射强度 I_w 为

$$I_w = \frac{I_1}{1 - (1 - \epsilon_w)K}. \quad (13)$$

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在某一光谱下的表现半球发射率 ϵ 和表现方向发射率 ϵ_θ 。结束跟踪的能束最小辐射强度与开始跟踪的能束辐射强度之比为 10^{-6} 。界面 1 处的介质折射率为 n_1 ，温度为 T_1 ；界面 2 处的介质折射率为 n_2 ，温度为 T_2 ；介质层内温度线性分布。计算所得的表现发射率为界面 1 的表现辐射强度与 T_1 温度下黑体辐射强度的比值。

2.1 离散层数对计算结果的影响

为了保证计算结果的稳定与可靠性，首先比较了不同离散层数时的方向发射率分布，如图 3 所示，采用的计算参数见图 3。可以看出，在所计算的范围内，当天顶角小于 60° 时，离散层数不同的计算结

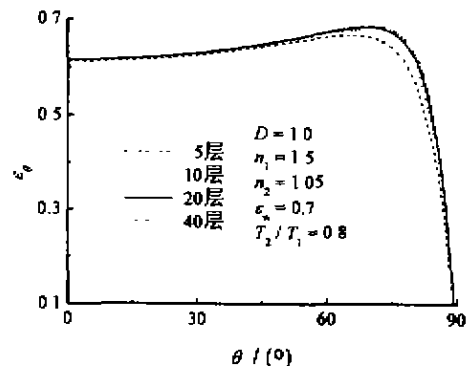


图 3 离散层数对方向发射率计算结果的影响
Fig. 3 Influence of sub-layer number on the calculated result of directional emissivity

果差别很小, θ 大于 60° 时, 较少的离散层数会导致明显的误差. 这是因为当入射角较大时, 其反射率改变迅速, 由于离散层数不同导致离散的折射率分布产生的影响变得明显. 当离散层数 N 为 20 和 40 时, 在整个半球空间的所有方向上, 计算结果已非常接近, 所以不必再增加离散层数.

2.2 等温介质表现方向发射率

图 4 是介质折射率均匀分布和线性分布条件下, 等温介质层的表现方向发射率分布. 与图 4(a) 对应的介质层光学厚度 $D=0.1$, (b) 中 $D=1.0$. 曲线 5、6、7 分别为折射率 $n=1.05$ 、1.5 和 2.0 的均匀分布情况. 图 4(a) 中曲线 5 的 ϵ_0 值在 θ 的大部分区

域小于曲线 6 和曲线 7 的 ϵ_0 值, 这说明, 折射率均匀分布情况下, 当介质层光学厚度较小时, 其表现发射率随折射率的增加, 呈先增后减的变化规律, 这与文献[1]的结论一致. 在图 4(a) 计算条件下, 折射率均匀分布介质层的表现发射率达到最大值的 n 值约为 1.54, 即曲线 6 的结果极为接近最大值. 当折射率分布是由壁面 2 向出射表面 1 线性递减时, 介质层的表现发射率大于这个最大值, 如曲线 2 和 4 与曲线 6 相比; 而若折射率分布是由壁面 2 向表面 1 线性递增时, 表现发射率则小于该最大值, 如曲线 1 和 3 所示.

由图 4(b) 可以看出, 当介质层光学厚度较大

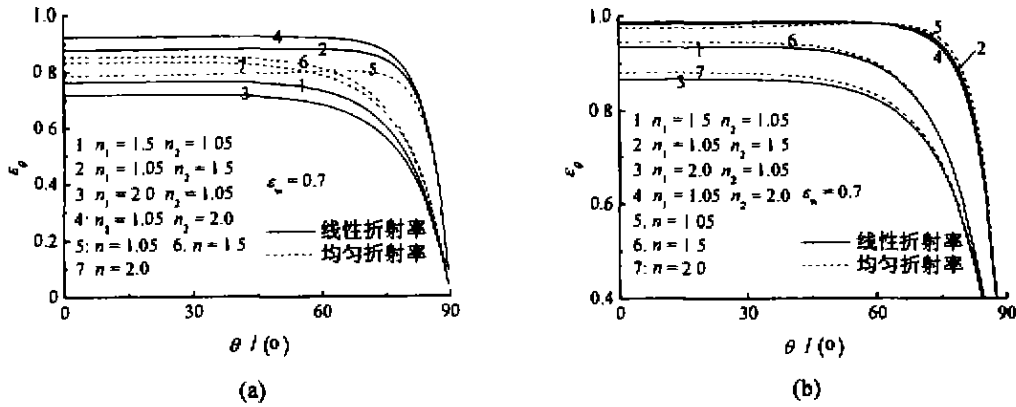


图 4 不同折射率分布时等温介质层的方向发射率

(a) $D=0.1$, (b) $D=1.0$

Fig. 4 Directional emissivities of isothermal medium layers with various refractive index distributions

(a) $D=0.1$, (b) $D=1.0$

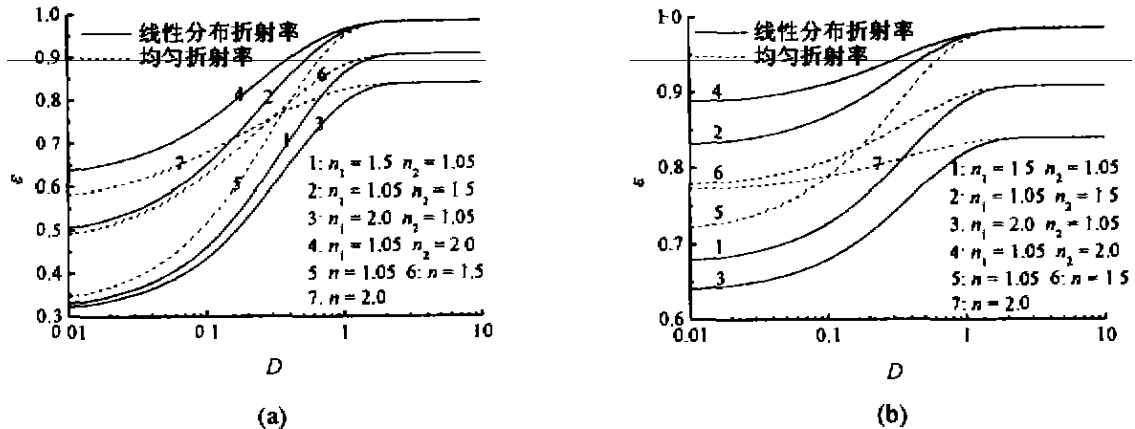


图 5 不同折射率分布时等温介质层的表现半球发射率

(a) $\epsilon_w=0.3$, (b) $\epsilon_w=0.7$

Fig. 5 Apparent hemispherical emissivities of isothermal medium layer with various refractive index distributions

(a) $\epsilon_w=0.3$, (b) $\epsilon_w=0.7$

时,介质层的梯度折射率效应变小,其表现发射主要受出射表面1处的折射率影响.

2.3 等温介质表现半球发射率

图5是不同折射率分布时,等温介质层表现半球发射率随介质光学厚度和壁面2发射率的变化规律.可以看出,在介质层光学厚度不很大时($D > 1.0$),梯度折射率效应对表现发射率的影响明显;当介质层光学厚度较大时($D > 1.0$),梯度折射率效应逐渐消失,表现发射取决于出射表面1处的折射率大小、壁面2的发射率大小(图5(a) $\epsilon_w = 0.3$, (b) $\epsilon_w = 0.7$)仅影响发射率的大小,对其分布规律几乎无影响.在梯度折射率效应明显影响区($D \leq 1.0$),折射率的不同分布对表现半球发射率的影响规律与其对方向发射率的影响规律相同.

3 结论

通过对等温半透明介质层在不同光学角度下,介质折射率线性与均匀分布介质层表现光谱发射率的计算和比较分析,初步得出如下结论.

(1) 梯度折射率效应对半透明介质层表现发射的影响与光学厚度密切相关,当光学厚度较大时(> 1),其对表现发射的影响逐渐消失,表现发射取决于出射表面处的折射率.

(2) 当光学厚度不很大时(< 1),梯度折射率效应比较明显,不同的折射率分布对表现发生较大的影响.

(3) 当光学厚度较小时,折射率均匀分布的半透明介质表现发射率在某一折射率下达到一个最大

值,而当介质层折射率分布是由壁面向出射表面线性递减时,其表现发射率大于这个最大值.

REFERENCES

- [1] HUANG Yong, XIA Xin-Lin, TAN He-Ping, *et al.* Apparent emitting properties of a semi-transparent medium layer with specular semi-transparent surface and diffuse substrate. *Acta Energetica Solaris Sinica* (黄勇,夏新林,谈和平,等.具有半透明镜反射表面和漫射基底面的半透明介质层的表观光谱发射特性,《太阳能学报》),1999,20(2);116-121
- [2] HUANG Yong, XIA Xin-Lin, TAN He-Ping, *et al.* Apparent spectral emitting properties of a semi-transparent layer medium with a sine-shaped surface. *J. Infrared and Millimeter Waves* (黄勇,夏新林,谈和平,等.具有镜反射正弦表面的半透明介质层表观光谱发射特性,《红外与毫米波学报》),1999,18(4);276-282
- [3] Siegel R, Spuckler C M. Variable refractive index effects on radiation in semi-transparent scattering multilayer regions. *AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer*, 1993,7(4); 624-630
- [4] Siegel R. Transient thermal analysis of parallel translucent layers by using Green's functions. *AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer*, 1999, 13(1);10-17
- [5] Tan Heing, Wang Ping, Xia Xin-lin. Transient coupled radiation and conduction in absorbing and scattering composite layer. *AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer*, 2000,14(1); 77-87
- [6] QIAO Ya-Tian. *Graded Index Optics*. Beijing; Science Press (乔亚天.《梯度折射率光学》.北京:科学出版社), 1991
- [7] ZHAO Li-Xin. Thermal-optical evaluation to optical windows of space camera. *Acta Optica Sinica* (赵立新.空间相机窗口的热光学评价,《光学学报》),1998,18(10); 1440-1444