

文章编号:1001-9014(2009)01-0038-04

## 二维非线性梯度折射率介质的热辐射特性研究

黄勇, 王浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:**发展了二维梯度折射率介质热辐射传递的数值求解方法,研究了非线性折射率介质的表观方向发射率.研究表明,采用本文方法计算二维梯度折射率介质的表观方向发射率,最大相对误差小于1.6%.通过研究发现,二维非线性梯度折射率介质的热辐射能够呈现非常明显的定向辐射的特征,我们定义这种现象为类相干发射.

**关键词:**辐射传递;热发射;数值模拟;梯度折射率;类相干性

**中图分类号:**TK124;O435 **文献标识码:**A

### THERMAL EMISSION PROPERTIES OF A TWO DIMENSIONAL MEDIUM WITH NONLINEAR REFRACTIVE INDEX DISTRIBUTION

HUANG Yong, WANG Jun

(School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The radiative transfer solution method of a two-dimensional graded index semitransparent medium was developed. The apparent directional emissivity of the medium with nonlinear refractive index distribution was also analyzed. The results show that the numerical technique of this method has a high numerical precision by which the maximum relative error of apparent directional emissivity is less than 1.6%. Results also show that apparent emission of the medium has an obvious directional pattern. This phenomenon is named as a quasi-coherent thermal emission.

**Key words:** radiative transfer; thermal emission; numerical simulation; graded index; quasi-coherent property

#### 引言

改善物体的红外特性有重要的价值,也一直是红外研究的热点问题<sup>[1,2]</sup>. 物体的热辐射强度与物体表面的温度和发射率密切相关,降低物体表面的温度和热红外发射率是红外隐身研究的两条重要途径. 而物体的发射率是波长、方向的函数. 目前,人们主要采用红外隐身涂层和低发射率红外隐身薄膜来降低物体表面处于大气窗口波段的发射率. 但是改变热辐射方向对红外隐身的意义也是显而易见的. 例如,对于直升机来说,由于发动机排气并不产生推力,故其排气方向可任意改变,从而能有效抑制红外威胁方向的红外辐射特征<sup>[3]</sup>.

尽管改变热辐射的方向性对于红外隐身技术的发展是有益的,但到目前仅能从结构上改善物体红外辐射的方向性. 没有任何关于红外隐身涂层和低

红外发射率薄膜的研究中考虑到热辐射的方向性. 这是因为热辐射是一种典型的非相干光源,可近似认为各向同性发射.

近几年纳米科技的发展和负折射率材料的研制改变了传统观点<sup>[4,5]</sup>. 一些研究人员相继通过理论或实验研究,发现在材料表面刻蚀周期性的微槽或覆盖负折射率薄膜,可得到相干性较好的热辐射. 通过以上两者的作用,物体表面的红外辐射呈现较好的方向性. 但对于常规尺度下物体热辐射的研究,没有能够呈现明显方向性的报道.

本文将介绍我们关于二维梯度折射率半透明介质热辐射特性的最新研究成果. 从文中可以看出,通过梯度折射率对热辐射的调制作用,常规尺度下物体的热辐射也能具有良好的方向性. 我们称这种现象为热辐射的类相干性. 本文研究结果将为研制红外隐身材料和红外改性技术的发展提供一个新思路.

收稿日期:2008-01-16,修回日期:2008-06-18

Received date: 2008-01-16, revised date: 2008-06-18

基金项目:国家自然科学基金(50606003)和航空科学基金资助课题(2007ZA51006)

作者简介:黄勇(1974-),男,江西东乡人,博士,副教授,主要从事辐射传递、环境模拟研究.

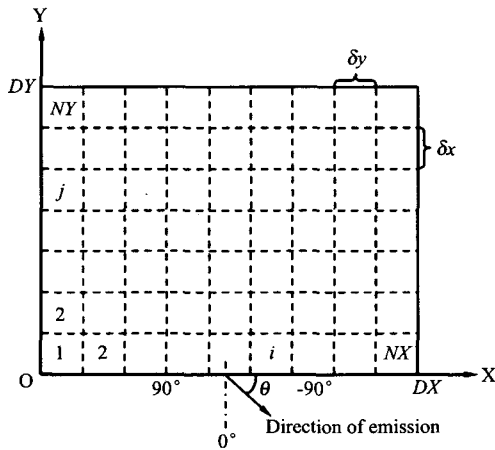


图1 物理模型和坐标系

Fig.1 Physical model and coordinate system

## 1 物理模型

二维梯度折射率半透明介质尺寸为  $DX \times DY$ , 介质内折射率、温度分布分别为  $n(x, y)$ 、 $T(x, y)$ , 介质的吸收系数  $\kappa$  为一常数, 介质与环境的界面是镜反射半透明界面. 对于二维空间任意分布的折射率  $n(x, y)$ , 难以直接求解它的弯曲路径. 为此我们将二维分布的折射率进行离散.

文[6]中, 我们把二维介质离散为  $NX \times NY$  个网格, 每个网格的尺寸为  $\delta x \times \delta y$ , 如图1所示. 同时做如下假设: 1) 每个网格内折射率均匀, 其值为网格中心点的折射率; 2) 辐射能在网格之间的界面传递时, 只考虑它的折射或全反射. 依据第一个假设, 每个网格内辐射能由沿弯曲路径传递变成沿直线传递, 极大地简化了每个网格内路径求解的难度. 第二个假设与热辐射在阶跃界面处的传递不相符, 但符合热辐射在梯度折射率介质内的传递特点.

基于上述假设, 二维线性折射率介质表现发射率的数值解与精确解最大误差接近 5% [6]. 为了进一步提高计算精度, 本文将每个网格内的折射率分布改进为

$$N(x', j) = n[(i-1)\delta x, (j-0.5)\delta y] + \frac{x'}{\delta x} \{n[i\delta x, (j-0.5)\delta y] - n[(i-1)\delta x, (j-0.5)\delta y]\}, \quad (1)$$

式中  $x' = x - (i-1)\delta x$ , 是每个网格当地坐标系内的横坐标. 从上式可以看出, 对于  $(i, j)$  网格, 二维的折射率分布  $n(x, y)$  变成沿  $x$  方向的一维分布. 同样, 也可以变成沿  $y$  方向的一维分布.

## 2 计算方法

### 2.1 辐射传递路径求解

为了叙述简便, 令小格内折射率分布为  $n(x) = n_1 + n_2 x / \delta x$ . 通过上节的处理, 介质内辐射能传递路径的求解就归结为计算如图2(a)所示单个网格内, 路径起始点  $(x_1, y_1, \vec{x}_1, \vec{y}_1)$  和尚待确定的终止点  $(x_2, y_2, \vec{x}_2, \vec{y}_2)$  之间的距离.

二维网格内一维折射率分布时的辐射传递路径求解和一维介质的情况有很大区别. 主要在于需要加入大量判断, 判断光线终点和  $x$  轴、 $y$  轴的交点以及全反射点是否在网格内等等. 基于我们以前对一维问题的求解, 我们推导出如下3个计算式:

$$y(x) = n(x_1) \sin \theta_1 \int_{x_1}^x \frac{dx}{\sqrt{n^2(x) - n^2(x_1) \sin^2 \theta_1 + y_1}} = \frac{n(x_1) \sin \theta_1 \delta x}{n_1 - n_2} \int_{x_1}^x \frac{dnx}{\sqrt{n^2(x) - n^2(x_1) \sin^2 \theta_1 + y_1}}, \quad (2)$$

$$x_2 = \left[ \frac{(1 + \cos \theta_1)^2 e^{\frac{2|y_2 - y_1|(n_2 - n_1)}{\delta x \cdot N(x_1, 1) \sin \theta_1}} + \sin^2 \theta_1}{2(1 + \cos \theta_1)^2 e^{\frac{2|y_2 - y_1|(n_2 - n_1)}{\delta x \cdot N(x_1, 1) \sin \theta_1}}} n(x_1) - n_1 \right] \frac{\delta x}{n_1 - n_2}, \quad (3)$$

$$s = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + y'^2(x)} dx \int_{x_1}^{x_2} \frac{n(x) dx}{\sqrt{n^2(x, j) - n^2(x_1, j) \sin^2 \theta_1}} = \frac{\delta x}{n_2 - n_1} (\sqrt{n^2(x_2) - n^2(x_1) \sin^2 \theta_1} - n(x_1) \cos \theta_1), \quad (4)$$

式中,  $\theta_1 = \arctan |\vec{y}' / \vec{x}'|$ . 计算中, 要根据起始点坐标和方向, 判断并计算辐射能和四个边界之一相交时, 终止点的位置和方向; 再根据终止点和起始点计算距离  $s$ . 式(2)是线性折射率介质内的光线方程, 可以利用判断得到的  $x_2$  计算  $y_2$ ; 式(3)是式(2)等号右边积分后的变换形式, 可以利用判断得到的  $y_2$  计算  $x_2$ ; 式(4)是根据得到的  $x_2$  计算两点之间的弯曲路径长度  $s$ .

确定光线与边界的交点非常繁琐, 本文仅对少量情况进行简单的描述. 假设  $n_1 > n_2$ , 若  $\vec{x} > 0$ , 则光线向  $x$  轴正方向传递时会发生全反射, 首先计算判断全反射点坐标  $(x_i, y_i)$  的  $x_i$  是否小于  $\delta x$ . 如果小于  $\delta x$ , 再计算  $y_i$  是否在  $0 \sim \delta y$  之间. 如果不在, 说明全反射点在小格外, 可根据  $\vec{y}$  的正负值分别计算光线与界面 2、4 的交点, 如图2(b)所示. 若  $y_i$  在  $0 \sim \delta y$  之间, 要计算光线通过全反射点后与  $x = 0$  线的交点, 再根据交点判断和界面 1、2、4 之一相交, 确定与相应的界面相交后再计算交点, 如图2(c)所示.

### 2.2 反向蒙特卡罗法

本文采用反向蒙特卡罗法 (Backward Monte Carlo method) 计算介质内的热辐射传递. 通常正向

的蒙特卡罗法是从介质内某发射点作为能束跟踪的起始点,然后跟踪能束在介质内行走、散射、反射、折射和吸收的各过程.如果能束从某处某方向射出界面,就是对该处该方向发射的贡献.反蒙特卡罗法中,以某处某射出方向的反方向作为能束跟踪的起始点,按照与正向蒙特卡罗法相同的概率函数跟踪能束在介质内行走、散射、反射、折射和吸收的各过程,直到所跟踪的能束穿出介质或被介质吸收.这时单根能束的辐射强度为

$$I_n = \int_0^l \kappa I_b dl' \quad (5)$$

式中,  $\kappa$  是介质的吸收系数,  $l$  是能束在介质内所穿过的所有路径,  $I_b$  为沿程当地温度的黑体辐射强度.将该方向所有能束的辐射强度平均,就可以得到所要求的某方向的辐射强度

$$I = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n \quad (6)$$

### 3 计算结果与讨论

本节计算如图 1 所示方向介质的表观方向发射率  $\varepsilon$ , 其定义为介质的辐射强度与同温度的黑体辐射强度之比. 在以下计算中, 设定二维半透明介质的几何参数为:  $DX=0.1\text{m}$ 、 $DY=0.1\text{m}$ .

#### 3.1 误差分析

图 3a 是折射率分布在  $n(x, y) = 1.1 + 6x + 2y$

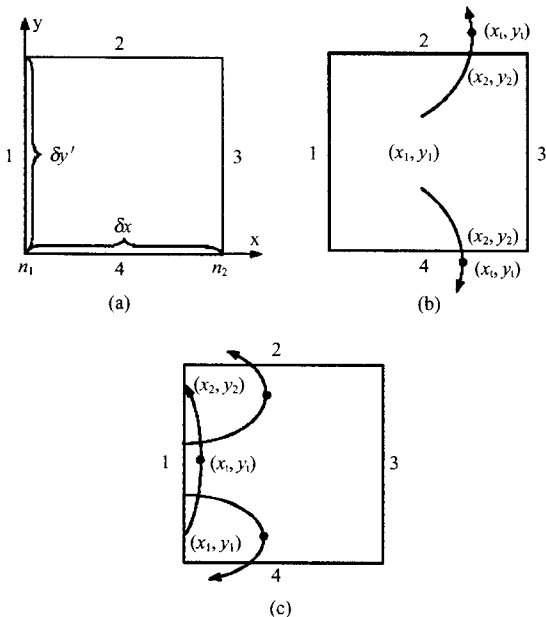


图 2 (a) 单个网格的模型图 (b) 单个网格内光线传递示意图 1 (c) 单个网格内光线传递示意图 2  
Fig. 2 (a) Physical model of a mesh (b) ray's trajectory in a mesh(case 1) (c) ray's trajectory in a mesh(case 2)

时,利用本文方法计算得到  $x$  在  $0.025\text{m}$  和  $0.05\text{m}$  两个位置时,热辐射的垂直分量方向发射率的结果.由于文[6]中精确解与本文结果基本重合,图 3(b) 给出本文计算结果与文[6]中精确解的相对误差.相对误差定义为:

$$\delta = \left| \frac{\text{数值解} - \text{精确解}}{\text{精确解}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

从计算结果可以看出,采用本文的数值方法,所得方向发射率的最大相对误差不超过 1.6%. 这表明本文对折射率离散的假设合理可行,计算精度高.

#### 3.2 非线性折射率介质的表观发射率

图 4(a) 是折射率分布为  $n(x, y) = 1.1 + 80\sqrt{(x-0.05)^2 + (y-0.05)^2}$  时,  $x=0.05\text{m}$  位置处的方向发射率.可以看出,贴近水平方向的狭小角度范围内,介质的热辐射有两个明显的凸起,其值约为法线方向的 3 倍,呈现出非常明显的定向辐射的特征.

图 4(b) 是折射率分布  $n(x, y) = 4.1 - 1.5\sin(10\pi x) - 1.5(10\pi y)$  时,  $x=0.05\text{m}$  和  $0.025\text{m}$  位置的方向发射率.从结果可以看出,定向辐射的特征更

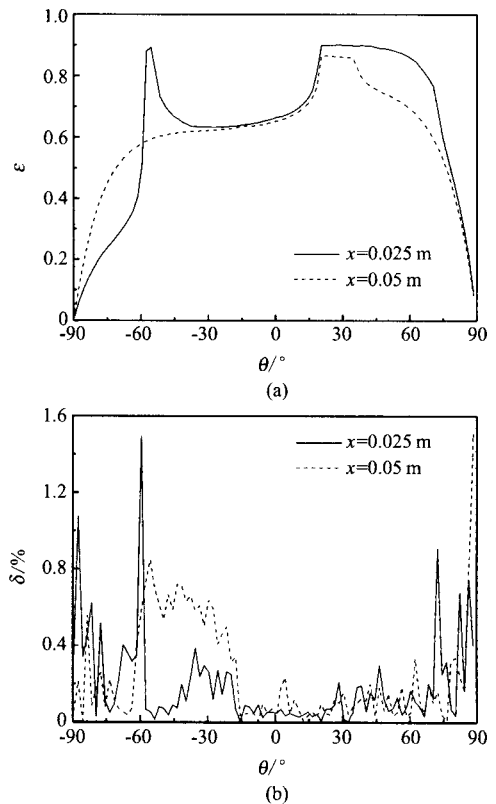


图 3 线性折射率介质的表观方向发射率和相对误差 ( $\kappa = 10\text{m}^{-1}$ ) (a) 方向发射率 (b) 与精确解的相对误差  
Fig. 3 Apparent directional emissivity and relative error of a linear refractive index medium ( $\kappa = 10\text{m}^{-1}$ ) (a) directional emissivity (b) relative error to the exact result

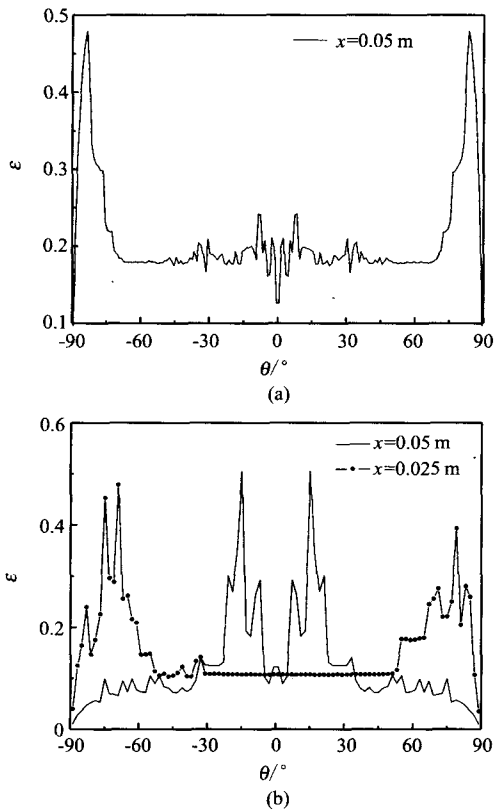


图4 非线性折射率介质的表现方向发射率( $\kappa = 1\text{ m}^{-1}$ )  
 (a)  $n(x, y) = 1.1 + 80 \sqrt{(x-0.05)^2 + (y-0.05)^2}$  (b)  $n(x, y) = 4.1 - 1.5\sin(10\pi x) - 1.5\sin(10\pi y)$   
 Fig. 4 Apparent directional emissivity of a nonlinear refractive index medium ( $\kappa = 1\text{ m}^{-1}$ ) (a)  $n(x, y) = 1.1 + 80 \sqrt{(x-0.05)^2 + (y-0.05)^2}$  (b)  $n(x, y) = 4.1 - 1.5\sin(10\pi x) - 1.5\sin(10\pi y)$

加明显. 热辐射一般在法线方向具有较大的发射率, 并且热辐射随角度的变化比较平缓. 但本文得到的研究结果和传统的认识完全不同. 对于均匀折射率的介质, 如果热辐射的发射方向改变一个微小的角度, 与其对应的介质内部的传递路径及辐射能在介质层边界处的反射率也有微小的变化. 但对于梯度折射率介质, 发射方向的微小变化, 有时会导致内部路径和壁面反射率发生强烈的非线性变化. 另外从图4(b)中可以看出, 如果考虑所有位置的热发射, 热辐射的方向性有一定程度的减弱, 但法线方向附近的热辐射还是较低. 我们认为降低法线附近的热

辐射对红外隐身是很重要的, 因为根据兰贝特定律, 不同方向单位立体角内热辐射的能量和方向的余弦成正比. 对于黑体, 尽管接近水平方向的热辐射方向发射率也是1, 但单位立体角内的辐射能接近零.

#### 4 结语

对于二维梯度折射率介质热辐射传递的研究, 本文提出了一种新的折射率离散方式. 计算结果表明采用这种折射率的离散形式可以获得较高精度的计算结果. 对于非线性折射率介质的热辐射研究发现, 介质的热辐射能够呈现奇特的定向辐射特征, 这表明梯度折射率具有调制表现热辐射方向的作用. 关于内部折射率分布对表现辐射特性影响的研究还将进一步深入进行, 以构造满足需求的内部折射率分布. 梯度折射率材料通常是作为一种光学元件, 这项研究结果预示梯度折射率材料在红外改性和红外隐身等领域也有潜在应用前景.

#### REFERENCES

- [1] QIN Su-Mei, TONG Zi-Yang, GUO Ming, *et al.* Effect of rapid thermal annealing on property of nano-SnO<sub>2</sub> thin film [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (秦苏梅, 童梓洋, 郭鸣, 等. 快速热退火对纳米晶粒 SnO<sub>2</sub> 薄膜性质的影响. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(2): 101—104.
- [2] SHEN Tao, SONG Jian-She. Research test and effectiveness evaluation of smoke interference [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈涛, 宋建社. 烟幕干扰的效果评价方法与测试研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 157—160.
- [3] SHAN Yong, ZHANG Jing-Zhou, LI Li-Guo. Numerical calculation and experimental verification for the infrared radiation characteristics of helicopter infrared radiation suppressor [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (单勇, 张靖周, 李立国. 直升机红外抑制器红外辐射特性的数值研究和实验验证. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(2): 95—100.
- [4] Greffet J J, Carminati R, Joulain K, *et al.* Coherent emission of light by thermal sources [J]. *Nature*, 2002, **416** (6876): 61—64.
- [5] Fu C J, Zhang Z M, Tanner D B. Planar heterogeneous structures for coherent emission of radiation [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(14): 1873—1875.
- [6] Huang Y, Liang X G. Approximate thermal emission models of a two-dimensional graded index semitransparent medium [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2006, **20** (1): 52—58.