

文章编号:1001-9014(2004)03-0217-04

## 梯度折射率对半透明介质温度场的影响

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, 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:**对梯度折射率半透明介质内辐射热平衡温度场进行了计算,考察了黑壁面及镜反射半透明界面时,线性和正弦两种不同折射率分布对温度分布的影响.当介质层边界为黑壁面,辐射能从光密介质向光疏介质传递时发生全反射导致某个热源在换热中的作用增大.当介质层具有镜反射半透明边界,除上述作用外,界面处的辐射换热也对介质内温度场产生影响.

**关键词:**热光学;辐射换热;梯度折射率;半透明介质

**中图分类号:**O435;TK124 **文献标识码:**A

## INFLUENCE OF GRADIENT INDEX TO THE TEMPERATURE FIELD OF SEMITRANSSPARENT MEDIUM

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, Beijing 100084, China;

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

**Abstract:**The temperature field of a semitransparent medium with gradient index was calculated. Two types of the refractive index distribution with black boundaries or specular semitransparent boundaries were discussed. One is linear refractive index distribution, and the other is sinusoidal refractive index distribution. We focused on their influence on the temperature field. When the medium has black boundaries, the inner total reflective happens; while the radiative energy transferred from optically denser medium to optically thinner medium, one boundary's influence to the heat transfer will be enhanced. When the medium has specular semitransparent boundaries, other than the above effect, the heat transfer happened on the boundaries also affects the inner temperature field of the medium.

**Key words:**thermo-optics; radiative heat transfer; gradient index; semitransparent medium

### 引言

梯度折射率是自然界一种普遍存在的客观物理现象,在工程中有大量伴随热效应的梯度折射率现象.例如,强激光在大气传输中,由于大气吸收了激光束的能量,导致光路加热,从而改变了大气的折射率分布.这种大气的激光“热晕”效应,会使激光束发生漂移、扩散、畸变或弯曲,影响激光武器的威力<sup>[1,2]</sup>.在测量技术领域,采用X射线的层析成像技术再现对象内部结构时,忽略折射率的变化引起的光线弯曲传递可认为是合理的.但对于激光层析成像技术,很多光谱下光的传递路径已不再是直线,尤其是对于诸如火焰、热等离子体等热光学介质的测

量.最近的研究结果表明,介质中折射率的变化对于非X射线辐射源的吸收场变化应该引起重视<sup>[3]</sup>.

此外,梯度折射率材料的研制目前得到很大发展.发展梯度折射率介质内辐射换热的研究,对于热环境下梯度折射率光学元件的热分析、热设计有重要意义.同时,本研究的结果对于光学常数不同的多层光学膜系统的光学与热分析<sup>[4]</sup>也有一定意义.

在前面的研究基础上<sup>[5,6]</sup>,本文计算分析辐射平衡条件下,不同折射率分布及边界情况时,梯度折射率对半透明介质内辐射换热的影响.

### 1 物理模型及计算方法

考虑一平板状半透明介质层,研究如下2个物

收稿日期:2003-03-31,修回日期:2004-02-19

Received date: 2003-03-31, revised date: 2004-02-19

基金项目:中国博士后科学基金(2003.03)、霍英东高等院校青年教师基金(81050)

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、近场辐射.

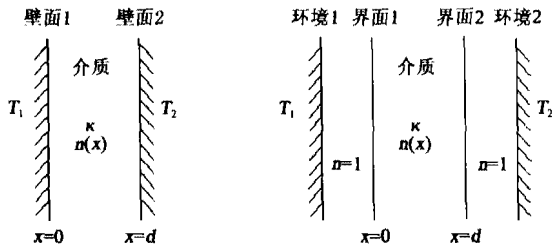


图1 物理模型1  
Fig.1 Physical model 1

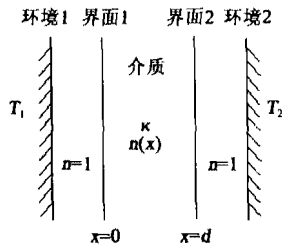


图2 物理模型2  
Fig.2 Physical model 2

理模型。模型 1 介质层的两界面为黑壁面,温度分别为  $T_1$ 、 $T_2$ ,如图 1 所示。模型 2 介质层两界面为镜反射半透明界面,辐射能穿过两界面时遵循 Fresnel 反射定律和 Snell 折射定律。该平板至于黑体环境中,环境折射率为 1,环境温度分别为  $T_1$ 、 $T_2$ ,如图 2 所示。介质的吸收系数为  $\kappa$ ,介质层厚度为  $d$ ,介质内折射率分布为  $n(x)$ 。

辐射平衡时,根据能量守恒,某点处介质发射的能量等于从整个空间传递来的辐射能被介质吸收的部分。由此,可得到如下关系式

$$4n^2(x)\sigma T^4(x) = \int_{\Omega=4\pi} I(x,\Omega) d\Omega \quad (1)$$

式(1)中  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数, $\Omega$  为  $4\pi$  空间某方向。文[6]提出一种离散形式的弯曲光线跟踪法,将梯度折射率用多层线性折射率代替,保持了介质内折射率分布的连续性,本文采用这种方法进行计算研究。

## 2 黑壁面的情况

图 3 是介质层两界面为黑壁面时,介质内的温度分布曲线。分别是均匀折射率分布、2 条线性折射率分布和 2 条正弦折射率分布时的温度场。计算取 2 壁面温度  $T_1$ 、 $T_2$  分别为 1000K、1500K,介质层的光学厚度  $\kappa d$  为 1。

当介质内折射率分布为  $n(x) = 1.2 + 0.6x/d$  时,壁面 1 处介质折射率为 1.2、壁面 2 处介质折射率为 1.8。辐射能从光密介质传向光疏介质时会发生全反射,即从壁面 2 发射的辐射能向壁面 1 方向传递时,部分会全反射返回壁面 2,如图 4a 中虚线所示。可以知道,高温壁面 2 发射的辐射能不仅影响介质内从壁面 2 到壁面 1 方向的辐射强度,而且影响壁面 1 到壁面 2 方向的辐射强度。该作用增强壁面 2 的发射在辐射换热中的作用,导致介质内温度(图 3 中曲线 2)比均匀折射率时介质内温度(图 3 中曲线 1)高。同样,当介质内折射率分布为  $n(x) =$

$1.8 - 0.6x/d$  时,壁面 1 的发射在辐射换热中的作用增强,介质内温度(图 3 中曲线 3)比均匀折射率时低。其辐射能传递示意图见图 4b 中虚线。

当介质内折射率分布为  $n(x) = 1.2 + 0.6\sin(\pi x/d)$  时,壁面 1、2 处介质折射率为 1.2,介质层中心处折射率为 1.8。介质层中心是光密介质、两端是光疏介质,辐射能从介质层中心向两端传递时会发生全反射,如图 4c 中虚线所示。这种作用将促进介质层内部的辐射换热,使得介质层内温差减小。如图 3 中曲线 4 所示,介质层两端温差比均匀折射率时两端温差小。当介质内折射率分布为  $n(x) = 1.8 - 0.6\sin(\pi x/d)$  时,壁面 1、2 处介质折射率为 1.8,介质层中心处折射率为 1.2。介质层两端是光密介质、中心是光疏介质,从两壁面发出的辐射能向介质层中心传递时均部分发生全反射,如图 4d 中虚线所示。这导致壁面 1 发射的辐射能对壁面 1 附近的介质作用增强,壁面 2 发射的辐射能对壁面 2 附近的介质作用增强。其结果是介质层两端温差加大,如图 3 中曲线 5 所示。

## 3 镜反射半透明界面情况

图 5 是两壁面温度  $T_1$ 、 $T_2$  分别为 1000K、1500K 时,物理模型 2 的温度场研究结果。该结果与模型 1 的情况有较大差别。图 5a 是介质层光学厚度  $\kappa d$  为 1,5 种不同折射率分布时的温度分布计算结果。

当介质内折射率分布为  $n(x) = 1.2 + 0.6x/d$  时,界面 1 处折射率为 1.2、界面 2 处折射率为 1.8。根据 Snell 折射定律,可以知道从环境进入界面 1 的辐射能其直接影响区域大于进入界面 2 的直接影响区域,  $\arcsin[1/n(0)] > \arcsin[1/n(d)]$ ,如图 4a 所示。或者也根据 Fresnel 反射定律可以知道此时环境发射的辐射能在界面 1 处的反射率  $\rho_1 (= 0.0443)$

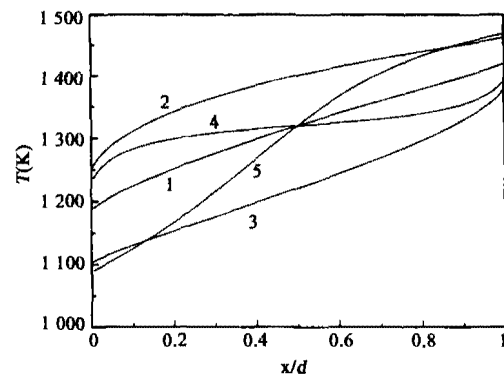


图3 平板内温度场分布(模型 1,  $\kappa d = 1$ )  
Fig.3 Temperature field inside the slab(model 1,  $\kappa d = 1$ )

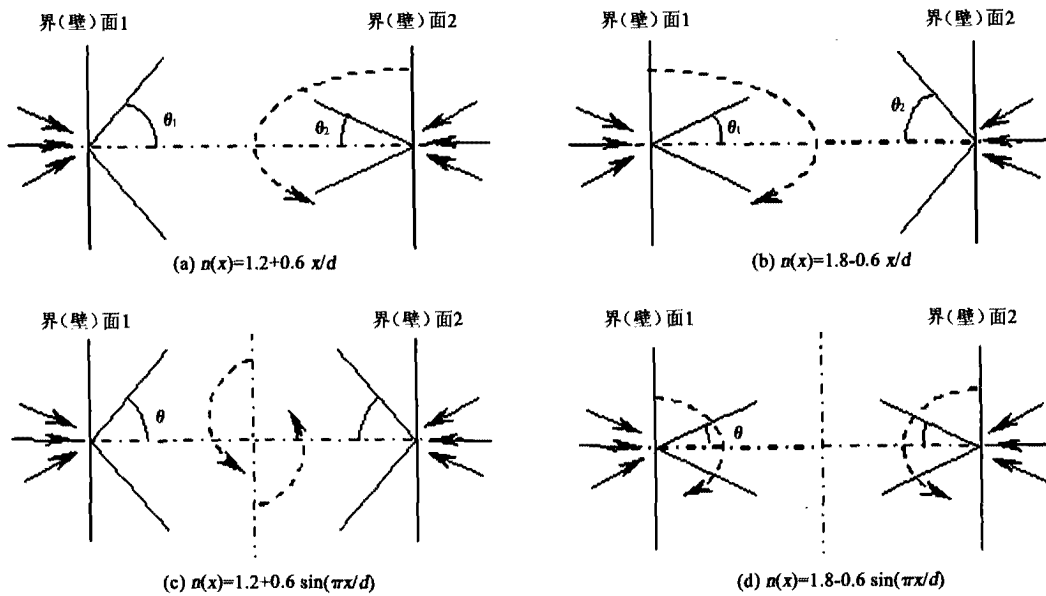


图4 辐射能传递示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of radiative transfer

小于在界面2处的反射率 $\rho_2$  ( $=0.134$ ).

上述分析表明当介质内折射率分布为 $n(x) = 1.2 + 0.6x/d$ 时,环境(低温)与界面1的换热较环境(高温)与界面2的换热更为强烈.这将导致介质内温度较均匀折射率时相比较低,如图5a中曲线2所示.均匀折射率的计算结果曲线1a,1b,1c分别是折射率为1.2,1.5和1.8的情况.同样,当介质内折射率分布为 $n(x) = 1.8 - 0.6x/d$ 时,介质内温度较均匀折射率时相比较低,如图5a中曲线3所示.

除上述作用外,上一节提到由于辐射能从光密介质向光疏介质传递时发生全反射在此也发生作用,对温度场产生影响.可以知道,这种内部传递作用与界面处的交换作用对内部温度场的影响作用是相反的.当介质层光学厚度增加时,内部的传递作用影响逐渐增大.图5b是介质层光学厚度为5时线性折射率与均匀折射率介质温度场的计算结果.可以看出,相比光学厚度较小的情况,这时两种相反分布的线性折射率介质层内温度场比较接近.

当介质内折射率分布为 $n(x) = 1.2 + 0.6\sin(\pi x/d)$ 时,上一节提到的辐射能从光密介质(介质中心)向光疏介质(介质层两边界)传递时发生全反射在此依然发挥作用,相比均匀折射率的情况,该作用会减小介质层两端的温差.对于本模型的情况,这时两边界处折射率为1.2.相比折射率为1.5、1.8的均匀折射率介质层,这时环境热辐射直接影响区域大、表面反射率小,它与环境的换热更强,将增大

介质层两端的温差.所以这时计算结果显示介质层两端温差比折射率为1.5、1.8的均匀折射率介质层大,而比折射率为1.2的均匀折射率介质层小,如图5a中曲线4与曲线1a、1b、1c.

当介质内折射率分布为 $n(x) = 1.8 - 0.6\sin(\pi x/d)$ 时,与上述情况相反.一方面辐射能从光密介质(介质层两端)向光疏介质(介质层中心)传递时发生全反射,增大介质层两端温差.另一方面,这时两边界处折射率为1.8,相比折射率为1.2、1.5的均匀折射率介质层,这时环境热辐射直接影响区域小、表面反射率大,它与环境的换热较小,将减小介质层两端的温差.这时计算结果显示介质层两端温差大于折射率为1.5、1.8的均匀折射率介质层,小于折射率为1.2的均匀折射率介质层,如图5a中曲线5与曲线1a、1b、1c.同时结果显示,折射率分布为 $n(x) = 1.2 + 0.6\sin(\pi x/d)$ 的介质层两端温差和折射率分布为 $n(x) = 1.8 - 0.6\sin(\pi x/d)$ 的情况相差不大.

#### 4 小结

本文对梯度折射率半透明介质内辐射热平衡时温度场进行了计算,考察了黑壁面及镜反射半透明界面时,线性和正弦两种不同折射率分布对温度分布的影响.结果表明半透明介质内的折射率分布及界面特性对介质内的温度场影响很大.

当介质层具有黑壁面的边界时,介质内折射率

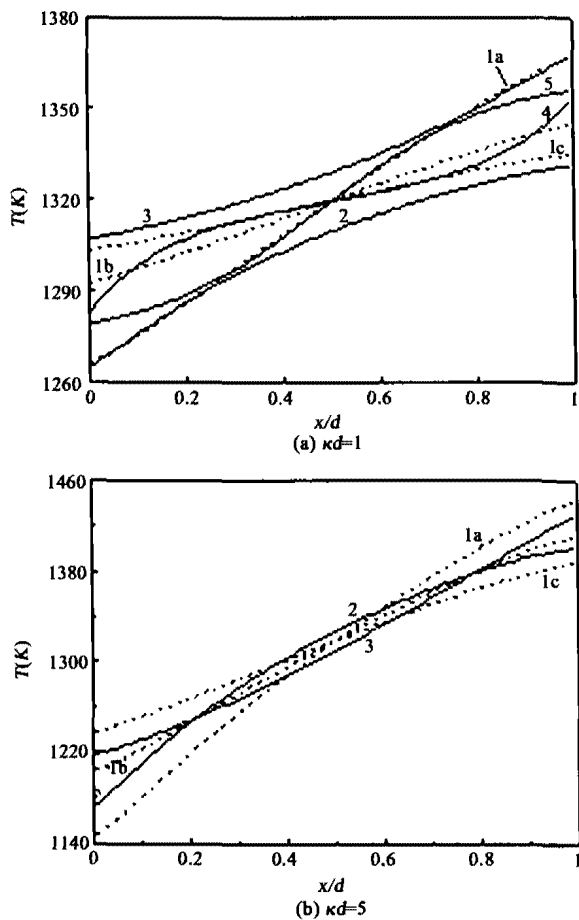


图5 平板内温度场分布(模型2)  
Fig. 5 Temperature field inside the slab(model2)

分布的影响单独发生作用,其作用可归结为辐射能从光密介质向光疏介质传递时发生全反射导致某个热源在换热中的作用增大.对于线性折射率分布的介质层来说,其结果表现为介质层内温度相比均匀折射率的情况高或低;对于正弦折射率分布(半个正弦分布)的介质层来说,其结果表现为介质两端温差比均匀折射率的情况增大或减小.

当介质层具有镜反射半透明边界,且受折射率为1的环境辐射加热时,除上述内部全反射作用外,界面处的辐射换热也对介质内温度场起作用.界面处的辐射换热与界面处的折射率大小密切相关,当界面处折射率较小时,环境的辐射能对介质层内影响区域大,表面的反射率小,它与介质层的辐射换热较强;反之则较弱.若半透明介质层两端折射率不同,则与折射率小处界面换热的环境在介质层中的影响会增大;若半透明介质层两端折射率相同,则该折射率值增大会减小介质层两端温差,该折射率值减小会增大介质层两端温差.

## REFERENCES

- [1] QIANG Xi-Wen, WANG Tie-Liang, WU Nai-Qing. Multi-laser-beams atmospheric propagation [J]. *Optoelectronic Technology*(强希文,王铁良,吴乃清.多光束激光大气传输. *光电技术*), 1999, **19**(3): 167—172.
- [2] SHE Hui, TAN Sheng. Development and application prospects of high-energy laser weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*(余辉,谭胜.高能激光武器的发展和应用前景. *红外与激光工程*)2002, **31**(3): 267—271.
- [3] Ben Abdallah P, Sakami M, Le Dez V, et al. Optical remote sensing inside an inhomogeneous axisymmetric medium; the absorption field measurement [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(3): 411—417.
- [4] ZHENG Yu-Xiang, JU Xiao-Hua, ZHANG Rong-Jun, et al. Thermal and optical analysis of magneto-optical recording multiplayer film system [J]. *J. Infrared Millime Waves*(郑玉祥,巨晓华,张荣君等.磁光存储多层膜系统的光学与热分析方法. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(1): 18—22.
- [5] 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 Millime 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.
- [6] HUANG Yong, XIA Xin-Lin, TAN He-Ping. Comparison of two methods for solving radiative heat transfer in a gradient index semitransparent slab [J]. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 2003, **44**(1): 83—99.