

气动加热下光学窗口传热特性的数值模拟

李东辉 夏新林 艾青

(哈尔滨工业大学航空航天热物理研究所, 哈尔滨 150001)

文 摘 针对气动加热条件下光学窗口辐射导热耦合传热开展研究,以了解光学窗口的热辐射发射规律及热防护性能。采用有限体积法、蒙特卡罗法、谱带模型建立了具有镜反射界面的光学窗口辐射传输及辐射导热耦合传热计算模型,对具有两层 SiO₂ 玻璃的光学窗口传热特性进行了模拟。结果表明处于高温区玻璃向外发射热辐射,低温区玻璃吸收热辐射;除了加热面附近外的玻璃区域,辐射热流密度远大于导热热流密度,在 2.9~4.2 μm 谱带内的辐射热流密度大于 0.4~2.9 μm 谱带内的;在 0.4~2.9 μm 谱带内,可见光波长内的出射辐射热流密度最小,中红外波长范围内出射辐射热流密度最大。在光学窗口总厚度一定的情况下,降低玻璃层厚度和玻璃夹层气体热导率能够有效降低光学窗口非加热面稳态温度。

关键词 气动加热,光学窗口,耦合传热,辐射,谱带模型

Numerical Simulation on Heat Transfer Characteristics of Optical Windows Under Aerodynamic Heating

Li Donghui Xia Xinlin Ai Qing

(Aeronautics and Aerospace Thermophysics Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The radiation and conduction coupled heat transfer processes in optical windows under aerodynamic heating are studied in order to understand the thermal emission characteristics and the thermal protection properties. A computational model for the coupled heat transfer in optical windows with Fresnel interfaces is established by FVM, MCM and spectral band model. The heat transfer characteristics for a specific optical window with two SiO₂ glass layers are numerically simulated. Results show that the glass layer under aerodynamic heating has net radiation emission and the other layer has net radiation absorption. Radiative flux in the optical window is greater than conductive flux except in the vicinity of the heated surface. The radiative flux in the wavelength between 2.9 μm and 4.2 μm is greater than in the wavelength between 0.4 μm and 2.9 μm where the radiative flux going into spacecraft interior through the optical window has the lowest value in the visible spectrum and the highest value in the mid infrared spectrum. In the case of the optical window total thickness unvaried, decrease in both the gas conductivity and the gas layer thickness can effectively lower the steady state temperature of the optical window's unheated surface.

Key words Aerodynamic heating, Optical window, Coupled heat transfer, Radiation, Spectral band model

0 引言

高超声速飞行器在大气层内高速飞行时,在其周围形成激波、边界层及其相互作用的复杂流场,气体流过激波后受强烈压缩,气体温度、密度、压力升高,除了激波的压缩作用外,在飞行器表面由于气流高速

摩擦使大量动能转化为热能,由此形成非均匀流场,进而导致气体折射率变化,使目标光学信号通过时光程变化,降低目标信号质量^[1]。除了气动加热外,激波层内气体热辐射也会对飞行器表面产生一定辐射加热作用。高超声速飞行器光学窗口在强烈气动加

收稿日期:2011-09-30

基金项目:国家自然科学基金(90816022,51176038)

作者简介:李东辉,1971年出生,博士,研究方向为高温热防护材料辐射特性及耦合传热等。E-mail:ldh0086451@yahoo.com.cn

热和激波层热辐射作用下,被加热的玻璃层温度急剧升高,高温玻璃层将辐射能量,其中大部分能量辐射回外界环境,形式辐射散热;其余的部分热辐射和导热传递的热量引起光学窗口由外至内的温度梯度。光学窗口内的温度梯度导致光学窗口的热变形和热应力,进一步引起折射率变化,导致目标光学信号通过光学窗口的光程变化,目标图像偏移、抖动、模糊。高温玻璃层的热辐射和来自激波层气体的热辐射同样对光学成像探测系统形成辐射干扰,给光学成像制导带来了不利影响,降低飞行器对目标的探测、跟踪与识别能力^[2]。

近年来对光学窗口本身热辐射引起的对目标信号的干扰开展了实验^[3]和理论研究^[4-6],在假设光学窗口玻璃层温度分布的基础上采用普朗克黑体辐射定律分析了光学窗口本身热辐射对探测信号的影响。由于窗口玻璃在某些波长范围内对可见光和热辐射具有很好的透明性,玻璃的热辐射属于介质辐射,简单的采用普朗克黑体辐射定律进行分析可能并不合适。本文针对光学窗口的辐射导热耦合传热过程开展研究,以了解在气动加热条件下光学窗口温度分布特征、光学窗口热辐射发射规律及通过光学窗口的辐射热流密度特征。采用蒙特卡罗法、谱带模型建立了具有镜反射界面的光学窗口的辐射传输与辐射换热计算模型,采用有限体积法建立了在气动加热条件下的光学窗口辐射导热耦合传热计算方法,对具有两层玻璃的光学窗口传热特性进行了模拟,获得了光学窗口的温度分布、透过光学窗口的总热流密度、辐射热流密度、谱带辐射热流密度、导热热流密度等参数,分析了气体热导率、气体层厚度的影响。

1 光学窗口传热模型与计算方法

1.1 数学物理模型

光学窗口由多层玻璃平板组成,相邻两个玻璃平板间存在有真空夹层或者气体层,如图1所示。

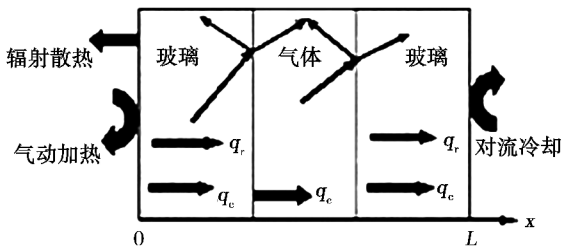


图1 光学窗口传热示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the heat transfer in an optical window under aerodynamic heating

玻璃平板内热量传递包括导热和热辐射两种基本方式,玻璃平板为热辐射吸收发射介质,气体层不存在热辐射换热,只存在导热,气体层内的传热可以宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012年 第2期

看作辐射源项为零的耦合换热问题,于是光学窗口辐射导热耦合传热控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho(x)c(x)T(x,t)] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right] - \frac{\partial q_r(x)}{\partial x} \quad (1)$$

式中, $\rho(x)$ 、 $c(x)$ 、 $\lambda(x)$ 、 $q_r(x)$ 分别为在光学窗口 x 处的密度、比热容、热导率与辐射热流密度。

光学窗口加热面的边界条件为

$$-\lambda(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L} - q_a + \varepsilon_{w,op} F_{op} \sigma T_w^4 = 0, t > 0 \quad (2)$$

式中, L 是光学窗口总厚度, q_a 为气动加热热流密度, $\varepsilon_{w,op}$ 为不透明波长范围(谱带)内加热面对外界环境的发射率, F_{op} 为不透明谱带内的黑体辐射份额,表示该谱带内黑体辐射力占全光谱总辐射力的百分数。

光学窗口的非加热面采用对流冷却边界

$$-\lambda(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Big|_{x=0} = \alpha_c (T|_{x=0} - T_{f,c}), t > 0 \quad (3)$$

式中, α_c 、 $T_{f,c}$ 为舱内流体对流换热系数和温度。

光学窗口初始条件为

$$T(x,0) = T_0, x \in [0, L] \quad (4)$$

式中, T_0 为初始温度。

光学窗口中玻璃与空气的界面满足热流密度和温度连续的界面条件^[7]。

1.2 光学窗口耦合传热数值计算方法

首先进行光学窗口辐射传输计算,获得所有玻璃层内控制体的辐射热流密度散度,在整体网格系统内采用有限体积法离散耦合传热控制方程,边界条件的处理采用直接离散边界条件的方法,离散代数方程组的求解采用 TDMA 算法。

光学窗口中的玻璃在某些谱带内具有一定的透明性,在另一些谱带内可以认为是不透明的,半透明谱带内辐射特性的非灰体特征采用谱带模型来加以描述。光学窗口的界面是透明镜反射界面,界面的透射率和反射率根据 Fresnel 定律、Snell 定律计算^[8]。

采用蒙特卡罗法求解光学窗口内热辐射传递与辐射换热^[8]。在谱带 $m (m = 1, M)$ 内通过对光子进行追踪与统计,得到该谱带内控制体 i 对控制体 j 的辐射传递系数 $RD_{m,ji}$,即控制体单元 ΔV_j (或 ΔA_j) 发射的光子个数经介质及界面的传递最终被单元 ΔV_i 吸收的百分数,据此可以计算出该谱带内控制体 i 的辐射换热源项为

$$(\nabla \cdot \mathbf{q}_{R,m})_i = \frac{1}{\Delta V_i} \sum_j RD_{m,ji}^* \cdot \sigma (T_j^4 - T_i^4) \quad (5)$$

式中, σ 为黑体辐射常数, $RD_{m,ji}^*$ 为谱带 m 内归一化辐

射传递系数,与辐射传递系数 $RD_{m,ji}$ 的关系如下

$$RD_{m,ji}^* = 4k_{am,j} \cdot \Delta V_j \cdot RD_{m,ji} \quad (6)$$

式中, ΔV_j 为体元控制体 j 的体积, $k_{am,j}$ 为体元控制体 j 在谱带 m 内的光谱吸收系数。

获得辐射换热源项后,通过对(5)式进行积分得到某个谱带内辐射热流密度,进而计算总辐射热流密度,并根据傅里叶定律计算导热热流密度。

2 光学窗口传热特性模拟分析

对具有两层玻璃的光学窗口在气动加热条件下的传热特性进行了模拟,光学窗口玻璃层厚度均为 20 mm,空气层厚度为 10 mm,玻璃材料为 SiO_2 ,密度为 $2\,200\text{ kg/m}^3$,比热容为 $790\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,热导率为 $1.34\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,光谱辐射特性如表 1 所示,空气密度为 1.293 kg/m^3 ,比热容为 $1\,000\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,热导率为 $0.02\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,加热面采用某典型气动加热边界条件,非加热面采用对流冷却边界条件,舱内流体温度为 300 K,对流换热系数取为 $10\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$,光学窗口初始温度 300 K,不考虑环境辐射。

表 1 SiO_2 玻璃的光谱辐射特性

Tab. 1 Spectral radiative properties of SiO_2 optical glass

波长/ μm	折射率	吸收系数/ m^{-1}
0.4~2.9	1.45	1
2.9~4.2	1.42	5
4.2~20	1.35	5000

从表 1 可见,在 $4.2\sim 20\ \mu\text{m}$ 谱带吸收系数很大,对 2 mm 玻璃层,光学厚度即达到 10,光学窗口中玻璃层厚度一般 $>2\text{ mm}$,可见,在该谱带内光学窗口的玻璃层可以认为是光学厚介质。采用 Rosseland 扩散近似估算 $4.2\sim 20\ \mu\text{m}$ 谱带的辐射热导率,当 1 000 K 时,辐射热导率大约为 $0.013\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,与 SiO_2 玻璃热导率 $1.34\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 相比非常小,随着温度降低,辐射热导率随温度三次方减小,因此,可以认为该谱带是不透明的,并忽略该谱带内玻璃层中的辐射传输。计算中假设在该不透明谱带内高温区玻璃加热面对外环境的发射率为 0.7。

图 2 给出了光学窗口的稳态温度分布,可以看到,两层玻璃的温降均较小,高温玻璃层大约有 50 K 温降,低温玻璃层大约有 25 K 温降,空气层的温降非常大,有大约 700 K 温降。图 3 给出了光学窗口稳态下热流密度分布,可以看到,在高温玻璃层中,由于温度高,辐射热流密度随 x 不断增大,在低温玻璃层中,由于温度较低,辐射热流密度随 x 不断减小,在空气层内辐射热流密度和导热热流密度均不随位置变化。

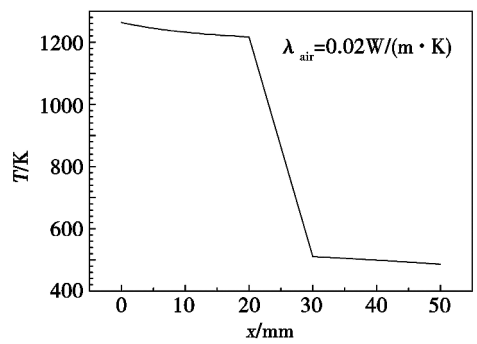


图 2 光学窗口稳态温度场

Fig. 2 Temperature in optical window under steady state

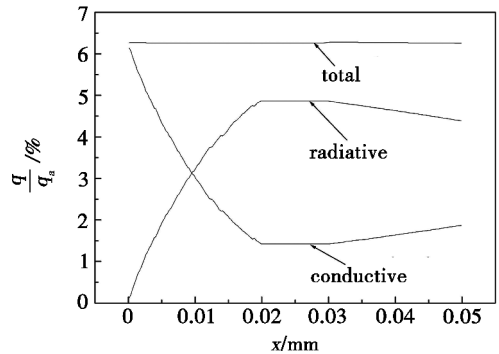


图 3 光学窗口稳态热流密度场

Fig. 3 Heat flux in optical window under steady state

图 4 给出了光学窗口稳态下各谱带辐射热流密度分布,可以看到,在波长为 $2.9\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 谱带内辐射作用远远大于 $0.4\sim 2.9\ \mu\text{m}$ 谱带,这是因为该谱带吸收系数较大,在高温下具有更强的辐射能力。

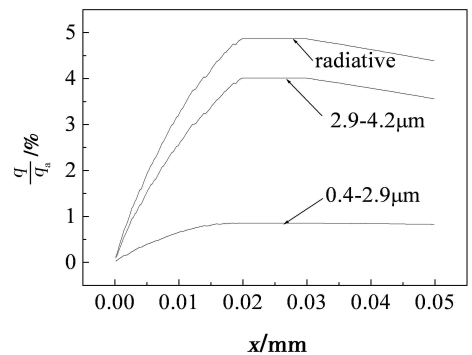


图 4 稳态谱带辐射热流密度分布

Fig. 4 Spectral radiative heat flux under steady state

根据图 4 中得到的 $0.4\sim 2.9\ \mu\text{m}$ 半透明谱带内的辐射热流密度和光学窗口高温玻璃的黑体辐射份额,按照式(7)可以进一步得到可见光 ($0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$)、近红外 ($0.8\sim 1.5\ \mu\text{m}$)、中红外 ($1.5\sim 2.9\ \mu\text{m}$) 三个谱带内光学窗口的出射辐射热流密度。

$$q_{R,\lambda_1-\lambda_2} = \frac{F_{\lambda_1-\lambda_2}(\bar{T}_h)}{F_{tr}(\bar{T}_h)} \cdot q_{R,tr} \quad (7)$$

式中, $q_{R,ir}$ 为 $0.4 \sim 2.9 \mu\text{m}$ 半透明谱带内光学窗口的出射辐射热流密度, $\lambda_1 - \lambda_2$ 代表可见光、近红外、中红外三个谱带的波长范围, \bar{T}_h 为高温玻璃的平均温度, $F_{ir}(\bar{T}_h)$ 为 $0.4 \sim 2.9 \mu\text{m}$ 半透明谱带内的黑体辐射份额。

表 2 给出了可见光、近红外、中红外、远红外四个谱带内光学窗口的出射辐射的光谱分布。

表 2 光学窗口出射辐射能量的光谱分布

Tab.2 Spectrally dependent radiative energy transmitted across optical window's unheated surface

谱带	波长范围/ μm	光谱分布/%
可见光	0.4 ~ 0.8	0.01
近红外	0.8 ~ 1.5	1.86
中红外	1.5 ~ 2.9	14.71
远红外	2.9 ~ 4.2	83.42

图 5 给出了气体热导率对稳态温度场的影响, 可见, 当气体热导率从 20 降低至 $2 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时, 低温区玻璃温度明显降低, 从 505 降低至 366 K , 再进一步降低气体热导率对稳态温度场影响很小。

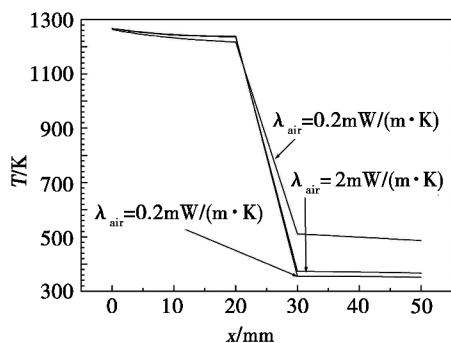


图 5 气体热导率对稳态温度场的影响

Fig.5 Gas conductivity influence on temperature under steady state

图 6 给出了气体层厚度对稳态温度场的影响。

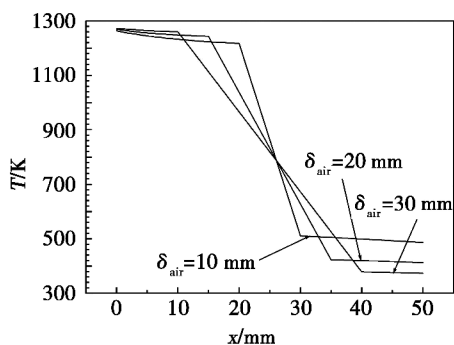


图 6 气体层厚度对稳态温度场的影响

Fig.6 Gas layer thickness influence on temperature under steady state

可以看到, 随气体层厚度的增加, 低温玻璃层温度显著降低, 当气体层厚度从 10 mm 增大至 30 mm 时, 光学窗口非加热面温度从 505 降低至 373 K , 这

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 2 期

是因为气体层厚度增大, 在总厚度不变的情况下, 玻璃层厚度减薄, 高温区玻璃辐射能力降低, 因此, 低温区玻璃温度较低。

3 结论

通过对光学窗口内传热机理分析, 建立了具有镜反射界面的光学窗口辐射传输与辐射换热计算方法与计算模型, 发展形成了求解光学窗口耦合传热问题的数值方法, 并开发了相应的数值模拟程序。通过对具有两层 SiO_2 玻璃的光学窗口在某典型气动加热条件下的稳态传热特性数值模拟分析, 得到以下主要结论。

(1) 在 SiO_2 的 $0.4 \sim 2.9$ 和 $2.9 \sim 4.2 \mu\text{m}$ 两个半透明谱带内, 在气动加热条件下, 对两层玻璃光学窗口, 处于高温区的玻璃向外发射热辐射, 而处于低温区的玻璃吸收热辐射; 除了加热面附近的玻璃区域外, 辐射热流密度远大于导热热流密度, 而在 $2.9 \sim 4.2 \mu\text{m}$ 谱带内的辐射热流密度大于 $0.4 \sim 2.9 \mu\text{m}$ 谱带内的; 在 $0.4 \sim 2.9 \mu\text{m}$ 半透明谱带内, 可见光波长内的光学窗口出射辐射热流密度最小, 中红外波长范围内出射辐射热流密度最大, 近红外波长范围内出射辐射热流密度介于两者之间。

(2) 在光学窗口总厚度一定的情况下, 降低玻璃层厚度和玻璃夹层气体热导率能够有效降低光学窗口非加热面稳态温度。

参考文献

- [1] Han Z P, Yin X L. Overview of study methods for aerodynamic effect of hypersonic missiles [J]. Modern Defense Technology, 2003, 31(3): 13-18
- [2] Fei J D. Preliminary analysis of aero-optics effects correction technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(5): 10-12
- [3] Zhang J Q, Zhang G Y, Fan J S, et al. The experimentation research of IR thermograph measurement affected by IR window's pneumatic calefaction [J]. Infrared Technology, 2001, 23(2): 32-34
- [4] Li X T, Cen Z F, Liu Q S. Analysis of infrared radiation from optical window with graded temperature distribution [C] // Proc. of SPIE, 2007, 6834, 68341B
- [5] 韩炜, 赵跃进, 胡新奇, 等. 超高速飞行器光学窗口气动光学效应分析 [J]. 光学技术, 2010, 36(4): 622-626
- [6] 马毅飞, 赵文平. 窗口辐射对红外成像探测影响的研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(3): 427-430
- [7] 李东辉, 夏新林, 艾青. 多层高温隔热结构的传热特性 [J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(1): 20-23
- [8] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006