

气动加热下高温陶瓷材料的红外辐射机理与特性

杜胜华, 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:从分析材料内部热辐射与导热耦合传热温度场、表面反射及折射之间的内在关系出发,建立了气动加热下高温陶瓷材料的红外辐射模型.采用控制容积法结合蒙特卡罗法和谱带模型,数值模拟了红外辐射能在材料内部的传递及出射过程.引入介质影响因子,分析了材料的红外辐射机理和外部气动热流对材料红外辐射特性的影响.结果表明,高温陶瓷材料内部热辐射的光谱选择性与温度场的耦合,导致高温陶瓷材料的红外发射率随气动热流变化而变化.由于陶瓷材料在紫外和中远红外谱带范围对辐射的吸收非常强,而在近红外和可见光谱带范围对辐射吸收较弱,随气动热流密度增大,对陶瓷材料表面红外辐射产生贡献的内部热辐射区域增大,但材料的红外发射率降低.

关键词:高温陶瓷;红外辐射;气动加热;介质影响因子

中图分类号:TK124 **文献标识码:**A

INFRARED RADIATION OF HIGH TEMPERATURE CERAMICS UNDER AERODYNAMIC HEATING

DU Sheng-Hua, XIA Xin-Lin

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

Abstract: An infrared radiation model for high temperature ceramics under aerodynamic heating condition was developed by analyzing the relationships between the internal thermal radiation, the temperature field of heat transfer, as well as the reflection and refraction at surface. The control volume method combined with the Monte Carlo method and spectral model were used to simulate the radiation heat transfer in the ceramics and outgoing process. The medium effect factor was introduced to analyze the infrared radiation mechanism of the material and the effects of aerodynamic heating on the infrared characteristics. The results show that the coupling of spectral selectivity of thermal radiation inside the high temperature ceramics of the temperature field results in the dependence of material infrared emissivity on the heat flux of aerodynamic heating. The high temperature ceramics absorbs radiation in ultraviolet, mid-infrared, and far infrared intensively while absorbs radiation in visible spectra and near infrared weakly. So, the effective region inside the material, where the thermal radiation of medium can contribute to the infrared emission of the material surface, enlarges with the increase of aerodynamic heating, but the infrared emissivity of material decreases.

Key words: high temperature ceramic; infrared radiation; aerodynamic heating; medium effect factor

引言

材料的红外辐射特性在红外探测^[1]、高温加热^[2]等领域有广泛的应用背景.近年来,高温陶瓷材料正逐渐应用于高速飞行器的辐射散热结构.红外发射率是表征陶瓷材料辐射散热能力的重要参数之一^[3],其红外辐射特性研究不仅对提高辐射散热能力很重要,而且对相关红外探测技术发展也有重要意义.

由于高温下陶瓷材料对热辐射呈现半透明性和很强的光谱选择性,表面的热辐射特性是辐射能在材料内部和表面之间传递的综合作用结果,为表观辐射效应^[4].一些学者从半透明介质内部辐射出发,采用不同数值方法模拟分析了介质的发射特性. Raman^[5]研究了金属和非金属材料的热发射率. Le Dez 和 Lallemand^[6]对等温和温度线性分布的半透明材料热发射特性进行了研究. Xia 等^[7]采用伪光源叠加法结合光线分裂技术和光线

收稿日期:2009-05-16,修回日期:2010-01-21

Received date: 2009-05-16, revised date: 2010-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 90816022、No. 50776026)

作者简介:杜胜华(1978-),女,湖北荆门人,博士研究生,主要从事表面热辐射特性研究.

踪迹技术分析了温度线性分布半透明介质的方向热发射特性;Li 等^[8]采用反向蒙特卡罗弯曲光线踪迹法研究了具有温度线性分布半透明介质的方向发射率。

目前,对材料热发射特性的研究大多针对具有线性分布温度的灰介质,而对具有强烈的光谱选择性和非线性温度场的高温陶瓷材料的表面红外辐射特性缺乏研究.本文通过建立气动加热下陶瓷材料热辐射的传输模型,采用控制容积法结合蒙特卡罗法和谱带模型,对高温陶瓷材料的红外辐射特性进行研究。

1 物理模型和控制方程

在高温气动加热环境中,陶瓷材料表面主要以热辐射的方式向环境散热.表征材料热辐射性能的光谱半球发射率为

$$\varepsilon_{\lambda,h} = \frac{\int_{\Omega=2\pi} I_{\lambda}(0, \Omega) \cos\theta d\Omega}{\pi I_{\lambda,b}(0)} \quad (1)$$

式中, λ 为辐射波长, μm ; $I_{\lambda}(0, \Omega)$ 为材料表面($x=0$) 出射的光谱辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,下同; $I_{\lambda,b}(0)$ 为材料表面温度下的黑体光谱辐射强度; θ 为出射辐射强度与表面法向的夹角; Ω 为立体角, sr .

由于陶瓷材料的半透明性,式(1)中 $I_{\lambda}(0, \Omega)$ 是材料内部热辐射传递和表面透射、反射综合作用的表面出射辐射强度.如图1所示,建立外部气动加热和材料内部导热-辐射耦合热传递模型.考虑热物性均匀的非灰、吸收性半透明的平板状陶瓷材料,热辐射出射表面 S_1 为半透明镜反射面,受均匀气动热流 q_a 加热;材料基底面 S_2 漫反射、不透明、绝热.陶瓷材料的厚度、光谱吸收系数和光谱折射率分别为 L 、 κ_{λ} 、 n_{λ} , κ_{λ} 和 n_{λ} , 与温度无关。

气动加热下,陶瓷材料的温度场受内部的辐射-导热耦合换热与不同辐射特性的边界控制,其辐射-

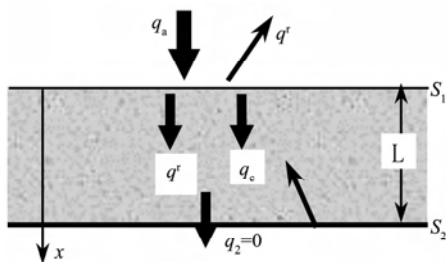


图1 气动加热下陶瓷材料的热辐射模型
Fig. 1 Thermal radiation model for ceramics under aerodynamic heating condition

导热耦合换热能量方程为:

$$\frac{d}{dx} \left(k_c \frac{dT}{dx} \right) - 4\pi \int_0^{\infty} k_{\lambda} [n_{\lambda}^2 I_{\lambda,b}(x) - \int_0^1 I_{\lambda}(x, \mu) d\mu] d\lambda = 0 \quad (2)$$

式中, k_c 为陶瓷材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $I_{\lambda}(x, \mu)$ 为 x 处沿 μ 方向的辐射强度; $\mu = \cos\theta$, 下同。

材料内部热辐射传递方程为

$$\frac{dI_{\lambda}(x, \mu)}{dx} + \frac{\kappa_{\lambda}}{\mu} I_{\lambda}(x, \mu) = \frac{\kappa_{\lambda}}{\mu} I_{\lambda,b}(x) \quad (3)$$

式中, $I_{\lambda,b}(x)$ 为与材料内 x 处温度相同的黑体光谱辐射强度。

气动加热下,表面 S_1 的热边界条件为

$$q_a + k_c \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \varepsilon_{\text{op}} \sigma (T_{S1}^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

式中, q_a 为气动热流, W/m^2 ; ε_{op} 为表面 S_1 向环境辐射的不透明谱带发射率; T_{S1} 为表面 S_1 温度; T_{∞} 为环境辐射温度, K 。

基底面 S_2 的热平衡方程为

$$-k_c \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} + \int_0^{\infty} [2\pi \alpha_w \int_0^1 I_{\lambda}^+(L, \mu) \mu d\mu - 4\pi n_{\lambda}^2 \varepsilon_w^i I_{\lambda,b}(L)] d\lambda = q_2 \quad (5)$$

式中, α_w 、 ε_w^i 分别为表面 S_2 面向材料内部的吸收率和发射率; 对绝热边界, $q_2 = 0$ 。

陶瓷材料内部半透明谱带的热辐射能束,传播到材料表面 S_1 内侧后,一部分被表面反射,在材料内部继续传播,一部分经表面折射进入材料外部空间($n=1$),形成热发射.根据电磁理论,半透明表面的光谱镜反射率为

$$\rho_{\lambda}^o = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\cos\varphi - n_{\lambda} \cos\theta}{\cos\varphi + n_{\lambda} \cos\theta} \right)^2 + \left(\frac{n_{\lambda} \cos\varphi - \cos\theta}{n_{\lambda} \cos\varphi + \cos\theta} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中, θ 为辐射能传播到表面处,能束与表面内法向的夹角, φ 为折射方向与表面外法向夹角, $\varphi = \arcsin(n_{\lambda} \sin\theta)$ 。

2 数值方法

在分析高温陶瓷材料表面的发射特性时,首先采用控制容积法对材料内部耦合传热能量方程式(2)进行全隐格式离散,得到离散方程

$$k_{ie} \frac{T_{i+1} - T_i}{(\delta x)_{ie}} - k_{iw} \frac{T_{i-1} - T_i}{(\delta x)_{iw}} + \Phi_i = 0 \quad (7)$$

式中, $(\delta x)_{ie}$ 、 k_{ie} 分别为节点 i 与节点 $i+1$ 的间距和界面当量导热系数; $(\delta x)_{iw}$ 、 k_{iw} 分别为节点 i 与节点 $i-1$ 的间距和界面当量导热系数; Φ_i 为辐射热源项,

代表能量方程式(2)中左端第二项.

采用蒙特卡罗法求解材料内辐射传递,将辐射传递方程(3)的求解,转变为对大量随机抽样光线传播过程的模拟跟踪.随机抽样光线在材料内的传播过程,包括在材料内部被散射或吸收、在基底面上被反射或吸收、在半透明表面被反射或折射.每个抽样光线的传播行程及其与材料和界面的作用结果根据相应的概率模型^[9],由抽样随机数确定.

引入谱带辐射传递因子 $RD_{k,j \rightarrow i}$,它表示离散单元 j 发出的 k 谱带辐射能经过材料和界面传播最终被离散单元 i 吸收的份额.通过对所有抽样光线的传播行为进行统计,获得谱带辐射传递因子.则辐射热源项 Φ_i 可表示为

$$\Phi_i = \frac{\sigma}{\Delta V} \sum_{k=1}^{NB} \left[\sum_{j=1}^M \overline{RD}_{k,j \rightarrow i} (F_{k,T_j} T_j^4 - F_{k,T_i} T_i^4) \right], \quad (8)$$

式中, NB 是半透明谱带数; M 为离散单元数; $\overline{RD}_{k,j \rightarrow i}$ 为归一化谱带辐射传递因子,对面单元和体单元分别有: $\overline{RD}_{k,j \rightarrow i} = \varepsilon_w (n_k)_j^2 \Delta A_j RD_{k,j \rightarrow i}$ 、 $\overline{RD}_{k,j \rightarrow i} = 4\kappa_k (n_k)_j^2 \Delta V_j RD_{k,j \rightarrow i}$, ΔA_j 、 ΔV_j 分别是单元面积和单元体积; F_{k,T_j} 为 k 谱带下单元 j 温度下的黑体辐射谱带份额函数.

对边界条件(4)、(5)两式也采用隐式格式离散.结合辐射源项和边界条件线性化,迭代求解离散化的能量方程,得到气动加热下的温度场.再采用蒙特卡罗法计算此温度分布下材料表面的半球发射率

$$\varepsilon_h = \frac{1}{T_{S_1}^4} \sum_{k=1}^{NB} \left(\sum_{j=2}^M \overline{RD}_{k,j \rightarrow S_0} F_{k,T_j} T_j^4 \right) + \sum_{k=1}^{NOP} \varepsilon_{op} F_{k,T_{S_1}} T_{S_1}^4, \quad (9)$$

式中, NOP 是不透明谱带数, $\overline{RD}_{k,j \rightarrow S_0}$ 是 k 谱带下单元 j 对表面 S_0 的归一化辐射传递因子, S_0 为与 S_1 无限接近的假想面.

3 验证结果

为了验证采用控制容积法结合蒙特卡罗法编制程序的可靠性,与文献[10]图2进行比较,计算参数分别为灰介质的折射率 $n=2$,光学厚度 $kL=2$,导热系数 $k_c=0.4536\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;表面 S_1 外部环境的辐射温度、对流换热系数分别为 $T_{\infty 1}=1500\text{K}$, $h_1=0$;表面 S_2 外部环境的辐射温度、流体温度和对流换热系数分别为 $T_{\infty 2}=500\text{K}$, $T_{g2}=500\text{K}$, $h_2=56.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.如图2所示,采用此计算方法得到的结果与文献[10]采用精确数值解和二流法结合格林函数求解结果吻合的很好,从而证明了所编制计算程序的正确性.

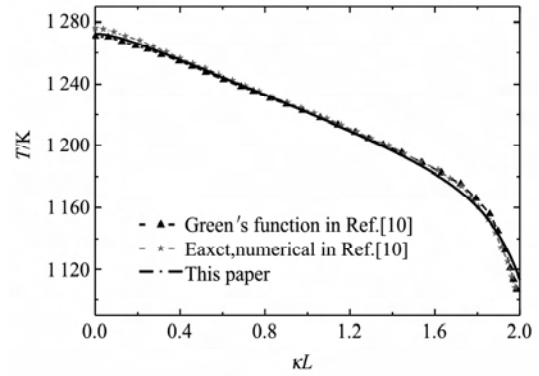


图2 与文献[10]计算结果的比较

Fig.2 Comparison with the results in Ref. [10]

表1 高温陶瓷材料的光谱特性数据^[11]

Table 1 Spectral property data of high temperature ceramics

k	$\lambda_1 - \lambda_2$	n_k	κ_k
1	0.3 - 0.5	1.91	7000
2	0.5 - 0.7	1.86	1600
3	0.7 - 1.0	1.86	1100
4	1.0 - 2.0	1.89	4400
5	0 - 0.3	1.96	5×10^6
6	2.0 - ∞	1.82	5×10^6

4 结果与讨论

影响气动加热下陶瓷材料红外辐射特性的因素较多,如材料的光谱特性与温度分布、散射特性以及表面辐射特性等.以下计算中,典型陶瓷材料的光谱特性采用表1中的数据.其中,材料不透明谱带的光谱特性按吸收系数非常大的半透明介质计算得出.

以下计算中,陶瓷材料的厚度、导热系数、光学厚度分别为 $L=10\text{mm}$ 、 $k_c=2.17\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $\tau_k = \kappa_k L$;基底 S_2 内侧发射率 $\varepsilon_w^i = 0.8$;环境辐射温度 $T_{\infty} = 300\text{K}$.在文献[12]的基础上,引入表面辐射的介质影响因子,进一步分析了高温陶瓷材料的红外辐射机理和特性.

4.1 气动热流对材料温度和发射率的影响

在工程应用中,高温陶瓷材料内的温度场与外部热环境条件密切相关.首先分析了外部气动热流加热下,材料内部导热-辐射耦合换热形成的温度场,如图3所示.

从图3可以看出,随气动热流增加,陶瓷材料表面附近的温度梯度增加.在基底面绝热条件下,离表面较远位置材料内部的温度比较均匀.

图4给出了气动热流对陶瓷材料光谱发射率和全光谱发射率的影响.

从图4可以看出,随着气动热流的增加,陶瓷材

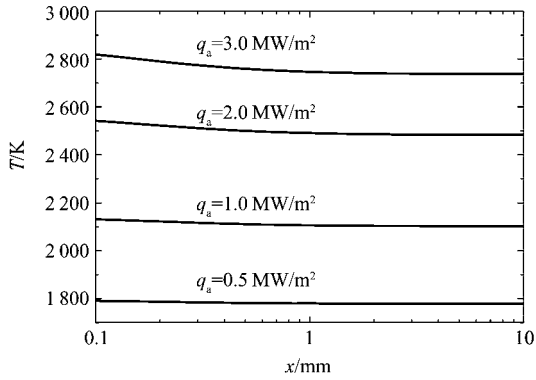


图3 气动加热下材料内的温度分布
Fig.3 Temperature distribution in the ceramics under aerodynamic heating condition

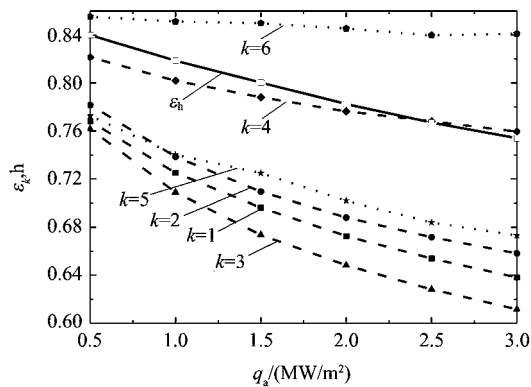


图4 气动热流对光谱发射率的影响
Fig.4 Effects of aeroheating flux on spectral emissivity

料的光谱发射率 $\epsilon_{k,h}$ 和全光谱发射率 ϵ_h 都呈下降趋势. 在半透明谱带范围内, 由于光谱吸收系数和光谱折射率的差别, 有 $\epsilon_{3,h} < \epsilon_{1,h} < \epsilon_{2,h} < \epsilon_{4,h}$. 不透明的中远红外发射率比各半透明谱带的发射率都大, 全光谱发射率与近红外发射率比较接近, 说明近红外辐射的能量份额较大.

从灰质介质的辐射传递看, 其它参数不变, 介质的发射能力增加或光学厚度增大, 都能使表面的辐射能力增强; 而半透明表面的反射率增大使表面的辐射能力减弱. 以谱带 $k=1$ 和 $k=3$ 为例, 比较陶瓷材料的光谱发射特性. 与 $k=3$ 相比, $k=1$ 的光谱折射率 n_k 和 τ_k 都较大, 但 $\epsilon_{3,h} < \epsilon_{1,h}$, 这说明光谱折射率 n_k 对材料表面辐射特性的影响很大, 折射率增大对材料内部发射能力的增强作用不能抵消其对表面内反射的增强作用.

比较不透明谱带 $k=6$ 和全光谱, 当气动热流增加时, $\epsilon_{6,h}$ 和 ϵ_h 变化都比较平缓. 这是由于 $\epsilon_h = \sum_{k=1}^6 F_k \epsilon_{k,h}$, 在气动热流增加时, 不透明谱带的黑体

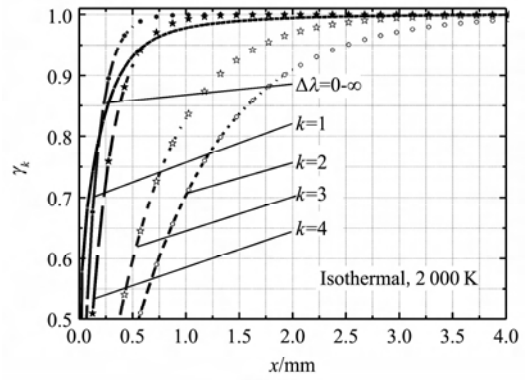


图5 等温材料表面光谱辐射的介质影响因子分布
Fig.5 Distribution of medium effect factors for spectral radiation of isothermal material surface

辐射份额 F_k 减小致使 $F_k \epsilon_{k,h}$ 在全光谱中所占份额减小, ϵ_h 受半透明谱带 F_k 的影响增加.

4.2 等温陶瓷材料红外辐射的介质影响

为了表征材料内部不同位置处热辐射对表面辐射散热能力的影响和贡献, 引入表面辐射的介质内热辐射直接光谱影响因子 $\gamma_\lambda(x)$, 简称表面光谱辐射的介质影响因子, 定义为

$$\gamma_\lambda(x) = \frac{\int_0^x I_\lambda(x^*) \exp(-\kappa_\lambda x^*) dx^*}{\int_0^L I_\lambda(x^*) \exp(-\kappa_\lambda x^*) dx^*} \quad (10)$$

$\gamma_\lambda(x)$ 表示在材料表面的热辐射总能量中, 介质内热辐射直接贡献的份额. 通过 $\gamma_\lambda(x)$ 的分布可判断对表面热辐射能力直接起作用的介质厚度.

材料的表面发射率一般在室温或等温条件下给出. 等温 ($T=2000\text{K}$) 条件下, 高温陶瓷材料表面辐射的介质影响因子分布, 如图5所示.

从图5和表2可以看出, 在等温 (2000K) 条件下, $\epsilon_{1,h} < \epsilon_{4,h} < \epsilon_{3,h} < \epsilon_{2,h}$, 各谱带的 $\epsilon_{k,h}$ 值相近, 但表面辐射的介质影响因子 $\gamma_k(x)$ 表现出很强的光谱性. 光谱折射率 n_k 对 $\gamma_k(x)$ 影响很大, 对于半透明谱带, $\gamma_k(x)$ 随着 n_k 的增大而增加; 对于折射率相同, $\gamma_k(x)$ 随光学厚度 τ_k 增大而增加, 见曲线 $k=2$ 和 $k=3$. 当 n_k 和 τ_k 同时增加时, τ_k 对 $\gamma_k(x)$ 的影响程度比 n_k 对 $\gamma_k(x)$ 的影响程度大, 如曲线 $k=3$ 和 $k=4$. 对于整个谱带来说, 当 $x=1.0\text{mm}$ 时, $\gamma_k(x)$ 趋近 1; 对于最小的光谱吸收系数 $\kappa_k = 1110\text{m}^{-1}$, $\gamma_k(x)$ 趋近 1 处的位置为 $x=4.5\text{mm}$, 在此谱带范围内对陶瓷材料表面辐射产生贡献的内部光谱热辐射区域最大.

表 2 等温陶瓷的光谱发射率和黑体辐射的谱带份额函数 ($\varepsilon_h = 0.8590$)

Table 2 Spectral emissivity of the isothermal ceramics and the spectral fraction function of blackbody radiation ($\varepsilon_h = 0.8590$)

k	1	2	3
$\varepsilon_{k,h}$	0.8512	0.8579	0.8578
F_k	3.2091×10^{-4}	5.8936×10^{-2}	7.4698×10^{-3}
k	4	5	6
$\varepsilon_{k,h}$	0.8538	0.8446	0.8632
F_k	4.1413×10^{-1}	9.3763×10^{-8}	5.1913×10^{-1}

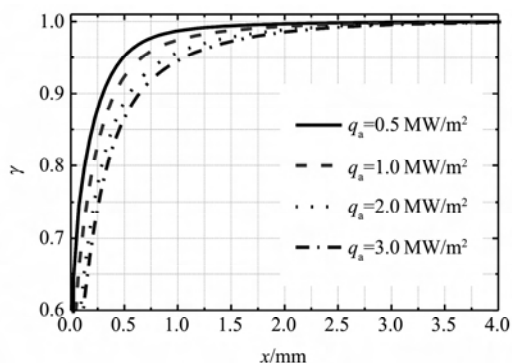


图 6 气动热流对表面辐射的介质影响因子的影响
Fig. 6 Effects of aeroheating flux on medium effect factors for radiation of material surface

4.3 气动加热下陶瓷材料的红外辐射特性

图 6 为在全光谱范围内,气动热流对陶瓷材料的表面辐射的介质影响因子的影响。

从图 6 可以看出,当外部气动热流增大时, $\gamma(x)$ 趋于 1 时的 x 增大,即对陶瓷材料表面辐射产生贡献的内部光谱热辐射区域增加.当气动热流从 0.5 MW/m^2 增大到 3.0 MW/m^2 时, $\gamma(x)$ 趋于 1 时的 x 从 1.5 mm 增加到 3.0 mm .

图 7(a)、(b) 是气动热流密度分别为 0.5 MW/m^2 和 3.0 MW/m^2 时,材料表面光谱辐射的介质影响因子分布。

可以看出,在气动热流加热下,由于陶瓷材料内部的温度场、光学厚度 τ_k 和折射率 n_k 对光谱发射率的共同作用,气动热流对材料表面光谱辐射的介质影响因子 $\gamma_k(x)$ 的影响并不明显,但是在全谱带范围内,表面辐射的介质影响因子减小,即对陶瓷材料表面辐射产生贡献的内部光谱热辐射区域增大。

5 结论

利用控制容积法结合蒙特卡罗法和谱带模型分析了气动热流加热下半透明陶瓷材料的红外辐射机理与特性,得出如下结论:

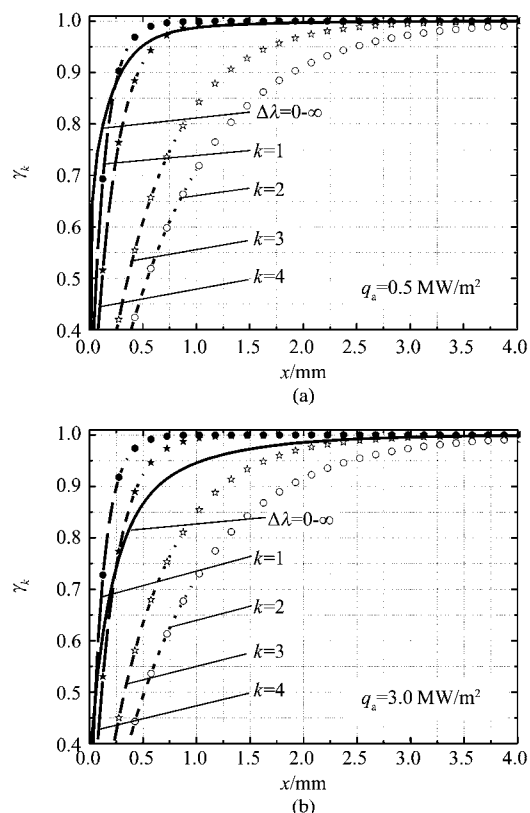


图 7 气动加热下表面光谱辐射的介质影响因子分布 (a) $q_a = 0.5 \text{ MW/m}^2$ (b) $q_a = 3.0 \text{ MW/m}^2$
Fig. 7 Distribution of medium effect factors for spectral radiation of material surface under aerodynamic heating condition (a) $q_a = 0.5 \text{ MW/m}^2$ (b) $q_a = 3.0 \text{ MW/m}^2$

(1) 表面气动热流增加,表面温度升高,峰值波长向短波方向移动,在陶瓷材料热物性不变的条件下,其光谱发射率与半球发射率都减小。

(2) 当气动热流增加时,材料表面附近的温度梯度增大,光学厚度较小的光谱发射率变化较大,全光谱范围内的发射率受半透明谱带的发射率影响较大。

(3) 当气动热流增加时,对陶瓷材料表面辐射产生贡献的内部光谱热辐射区域增加.当气动热流从 0.5 MW/m^2 增大到 3.0 MW/m^2 时,对陶瓷材料表面辐射产生贡献的材料厚度从 1.5 mm 增大到 3.0 mm 。

由于陶瓷材料在紫外和中远红外谱带范围对辐射的吸收非常强,而在近红外和可见光谱带范围对辐射吸收较弱,随气动热流密度增大,陶瓷材料的红外发射率降低,但对陶瓷材料表面红外辐射产生贡献的内部热辐射区域增大。

(下转 296 页)

向偏移了一个瞬时视场角大小,扫描角度范围变为 $-51.3^{\circ} \sim 47.7^{\circ}$ 。

3 结论

扫描参数校正模型应用结果的统计分析表明,引起 IRAS 扫描行的偏移是由毫秒计数的偏差导致,扫描方向上像元的偏移是由像元扫描角度的偏差引起的,因此同时修改毫秒计数和扫描角度两个参数解决了 IRAS 图像的定位偏差问题。本文提出的解决方案已放入红外分光计预处理系统,所提的分析思路可为其它同类型传感器出现类似情况时提供参考。

REFERENCES

[1] Rosborough G W, Baldwin D, Emery W. Precise AVHRR

image navigation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1994, **32**(3):644—657.

[2] Alexanin A I, Katamanov S N, Epstein Y S. Problems of accurate automatic navigation of NOAA/AVHRR and FY-1D satellite images[C]. In 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment (31st ISRSE), Global Monitoring for Sustainability and Security, Saint Petersburg, RF, June 20-24, 2005.

[3] Dong Yao-Hai, SUN Yun-Zhu, WANG Jin-Hua, et al. FY-3A polar meteorological satellite[J]. *AEROSPACE SHANGHAI*(董瑶海,孙允珠,王金华,等. FY-3A 极轨气象卫星. *上海航天*), 2008, **25**(5).

[4] CHEN Hai-Yan, YIN Qiu, Hu Yong, et al. Study on the effect of scanning parameter deviation on geolocation of line scanning optical sensor images. (陈海燕,尹球,胡勇,等. 行扫描光学传感器扫描参数对遥感图像定位结果影响模型研究. *上海航天*), 已录用.

[5] Report of FY-3 satellite infrared spectral radiometer design [R]. (FY-3 卫星红外分光计设计报告,中国科学院上海技术物理研究所), 2006. 1.

~~~~~

(上接 272 页)

### REFERENCES

[1] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, **43**(7-8):218—245.

[2] Han S H, Baek S W, Kim M Y. Transient radiative heating characteristics of slabs in a walking beam type reheating furnace[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, **52**(3-4):1005—1011.

[3] WU Wen-Ming, CHENG Lai-Fei, ZHANG Li-Tong, et al. Investigation on thermal radiation properties of C/SiC composites[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*(武文明,成来飞,张立同,等. C/SiC 复合材料热辐射性能研究. *固体火箭技术*), 2005, **28**(4):303—307.

[4] HUANG Yong, XIA Xin-Lin, TAN He-Ping, et al. Apparent spectral emissivity properties of a semi-transparent layer medium with a sine-shape surface[J]. *Infrared Millim 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.

[5] Raman R, Thakur A. Thermal emissivity of materials[J]. *Applied Energy*, 1982, **12**(3):205—220.

[6] Le Dez V, Lallemand M. Thermal emission of axisymmetric bodies of semi-transparent materials[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1992, **47**(5):345—352.

[7] Xia X L, Huang Y, Tan H P. Thermal emission and volumetric absorption of a graded index semitransparent medium layer[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2002, **74**(2):235—248.

[8] Li B X, Yu X J, Liu L H. Backward Monte Carlo simulation for apparent directional emissivity of non-isothermal semitransparent slab[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, **91**(2):173—179.

[9] TAN He-Ping, XIA Xin-Lin, LIU Lin-Hua, et al. Numerical calculation of infrared radiative transfer[M]. Harbin: Press of Harbin Institute of Technology(谈和平,夏新林,刘林华,等. *红外辐射特性与传输的数值计算*. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社), 2006:157—163.

[10] Siegel R. Transient thermal analysis of parallel translucent layers by using Green's function[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1999, **13**(1):10—17.

[11] Lee S C, White S, Grzesik J. Effect of particle size in composite material on radiative properties[C]. In AIAA 28<sup>th</sup> Thermophysics Conference. Orlando, FL, 1993, 1993—2729.

[12] DU Sheng-Hua, XIA Xin-Lin. Apparent thermal emission of high temperature ceramics submitted to aerodynamic heating[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*(杜胜华,夏新林. 气动加热下高温陶瓷材料的表观辐射特性. *工程热物理学报*), 2008, **29**(8):1383—1385.