

基于高温瞬态热响应的石英窗口 导热系数反演

石 宇¹, 夏新林¹, 陈 学¹, 王秦阳², 康宏琳²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国航天科工集团有限公司 第三研究院 北京空天技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 提出一种利用高温加热下瞬态热响应信息来同时反演石英窗口在不同温度下导热系数的方法。结合实验测试过程,首先建立石英窗口-石墨板-石英窗口三明治结构高温非灰体辐射-导热耦合传热模型。再通过实际测试温度响应结果和材料光谱辐射特性参数,构建石英窗口导热系数的遗传算法反演辨识模型。采用 1 100 K 加热条件下实验数据,反演辨识获得了常温至 1 100 K 石英窗口导热系数介于 1.35~2.58 W/(m·K),并拟合出高温导热系数关联式。结果表明:该材料辐射对导热系数影响随温度升高而增大,在 1 100 K 下辐射影响占比 16.12%。最终通过变工况的高温传热过程测试,验证了方法的可靠性及导热系数数据的准确性。

关 键 词: 石英窗口; 瞬态热响应; 导热系数; 辐射-导热耦合传热; 非灰体

中图分类号: V219

文献标志码: A

Inversion of thermal conductivity of quartz window based on transient thermal response at high temperature

SHI Yu¹, XIA Xinlin¹, CHEN Xue¹, WANG Qinyang², KANG Honglin²

(1. School of Energy Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Aerospace Technology Institute, The Third Academy,

China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100074, China)

Abstract: A method for simultaneous inversion of thermal conductivity of quartz window at different temperatures was presented by using transient thermal response information under high temperature heating. Combining the experimental test process, a high-temperature non-gray body radiative and conductive heat transfer model with a quartz window-graphite plate-quartz window sandwich structure was established firstly. Through the actual temperature response and the material's spectral radiation characteristic parameters, the genetic algorithm was used for constructing the inversion and identification model of the thermal conductivity of quartz window. The thermal conductivity of quartz window was inversed by the result data of 1 100 K heating conditions, ranging from 1.35 to 2.58 W/(m·K) at room temperature to 1 100 K, and the relationship

收稿日期: 2021-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51806046); 中国博士后科学基金(2020T130145)

作者简介: 石宇(1994—),男,博士生,主要从事高温导热辐射换热、高温热物性测量、辐射物性测量的研究。

通信作者: 陈学(1985—),男,讲师,博士后,主要从事太阳能光-热转换利用,多孔介质材料辐射特性及耦合换热的研究。

E-mail: hit_chenxue@hit.edu.cn

引用格式: 石宇,夏新林,陈学,等. 基于高温瞬态热响应的石英窗口导热系数反演[J]. 航空动力学报,2022,37(4):755-764. SHI Yu, XIA Xinlin, CHEN Xue, et al. Inversion of thermal conductivity of quartz window based on transient thermal response at high temperature[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(4): 755-764.

between thermal conductivity and temperature was fitted. The influence of radiation on the thermal conductivity of the material increased with the temperature, accounting for 16.12% at 1 100 K. Finally, the method and the accuracy of the thermal conductivity data were verified by the additional high-temperature tests.

Key words: quartz window; transient thermal response; thermal conductivity; radiative and conductive heat transfer; non-gray body

石英窗口是工程中常见的半透明材料,具有高透过性、低吸收性,广泛应用于太阳能利用、航天飞行、遥感技术、光学观测等领域^[1-4]。在工程应用中,准确获取石英窗口热物性、辐射特性十分必要。

导热系数是表征传热性能优劣的参数,一般通过稳态法、非稳态法进行测量。然而此类方法仅在测量不透明材料或者常温下测量半透明材料时精度较高。在高温条件下,石英窗口等半透明材料受热辐射影响,通过传统方法测量的导热系数存在较大误差^[5-6]。基于传统导热系数测量方法进行理论和实验的改进备受研究者的关注。Su等^[7]基于 3ω 法测量了锗酸盐微晶玻璃 295.5~780 K 温度范围内的有效导热系数。Bityukov等^[8]基于非接触平板法测量了石英窗口在 1 173~1 773 K 的导热系数。通过实验获取玻璃类材料的热扩散系数,可以间接计算出材料的导热系数。Shibata等^[9]基于激光闪光法分别测量石英窗口在 750~1 673 K、硅酸盐玻璃在 760~920 K 下的热扩散系数。Lazard等^[10]基于闪光法测量了浮法玻璃、 SiO_2 、 ZnSe 样品在正面吸收热脉冲时的背面瞬态温度,并建立平板内辐射-导热耦合方程反演出样品在 700 K 以下的热扩散系数。

此外,对其他半透明材料热物性反演研究主要集中于理论模型的建立及反演模型准确性分析。刘玉英等^[11]基于闪光法建立一维瞬态辐射-导热数学模型可测量半透明材料热扩散率。谈和平等^[12]基于激光脉冲法建立辐射-导热耦合模型可在已知光学特性条件下反演其导热系数。赵淑媛、何飞等^[13-14]基于稳态法及非稳态法建立辐射-导热模型反演求解纤维隔热材料的导热系数及辐射物性参数。Das等^[15]建立变导热系数的瞬态辐射-导热模型,研究了交叉率、突变概率、群体规模和世代数等参数对遗传算法反演导热系数的准确性。Daouas^[16]基于热线测量法建立了瞬态辐射-导热耦合二维模型,反演研究了金属泡沫的导热系数。Mironov等^[17]建立二维瞬态辐射-导热耦合

模型反演辨识硅质建筑陶瓷导热系数,比较了有效导热系数与考虑辐射效应的导热系数差异。

针对光学窗口等半透明材料的导热系数实验研究还比较缺乏。本文设计了石英窗口-石墨板-石英窗口多层结构,采用高温加热的方式,获取不同位置的温度响应曲线,以此作为输入,构建了石英窗口导热系数的反演辨识模型,通过分析与实际验证了方法和测试结果。其中,多层结构的非灰体辐射-导热耦合传热采用有限体积法求解,辐射传输通过蒙特卡罗法求解,反演优化方法选择遗传算法。

1 石英窗口导热系数反演模型

1.1 多层平板辐射-导热耦合传热模型

如图 1 所示,石英窗口材料瞬态热响应数据通过自研高温瞬态热性能实验台测试获取。该实验台可以进行 2 573 K 以下、0.1~200 000 Pa 环境下的瞬态热响应测试^[18]。在实验中,采用石英窗口-石墨板-石英窗口多层结构布置方式,两侧石英玻璃厚度 d_1 、 $d_3=10\sim30$ mm,中间石墨板厚度为 $d_2=10$ mm。两侧增加石墨板以保证辐射不透明边界条件,结构外缘添加保温棉。为获取高温瞬态传热温度响应,热电偶分别布置于第 1 层石英窗口加热侧、石墨板与第 1 层石英窗口接触侧以及第 2 层石英窗口绝热外侧。设置高温加热面温度后,通过数据采集记录夹层内测温点的瞬时温度变化,其加热侧、中间侧、冷却侧温度分别表示 T_{bw} 、 T_{bm} 、 T_{be} 。为减小界面热阻多层结构,通过螺栓及支撑杆压紧样品。由文献[19]可知,当通过螺栓压紧样品时,其界面温差与无压紧装置相比很小,本文石英窗口、石墨板均较为光滑,且有 9 个螺栓及 3 个支撑杆共同进行压紧处理,因此后期反演导热系数过程中未考虑其界面热阻。

本实验分别测量了 10 mm+10 mm、20 mm+20 mm 与 30 mm+30 mm 三种组合的石英窗口温度响应。基于实验设计,首先建立石英窗口-石墨板-石英窗口的高温耦合传热模型。由于平板厚

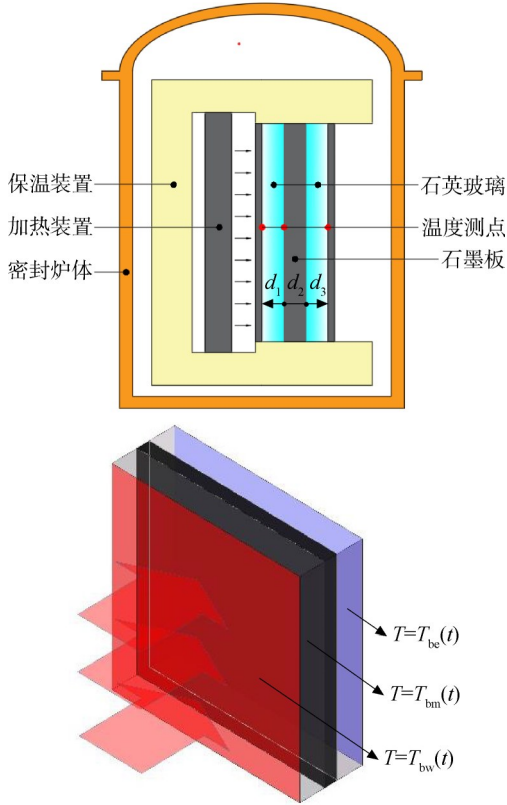


图1 高温热响应实验装置及样品布置示意图

Fig.1 High temperature thermal response experimental device and schematic diagram of sample layout

度远小于长宽尺寸,研究模型简化为一维多层平板辐射-导热耦合传热,控制方程为

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

式中 T 为温度; q_r 为辐射热流密度; ρ 、 c 、 κ 分别代表密度、比热容、导热系数; x 、 t 为位置及时间。

其初始条件及边界条件为

$$T(t=0) = T_0, T_1 = T_{bw}(t), T_2 = T_{be}(t) \quad (2)$$

式中 T_0 代表初始温度, T_1 、 T_2 代表两侧瞬态边界温度。

石英窗口内高温热辐射传递可以采用参与性介质内的辐射传输方程进行描述

$$\frac{dI_\lambda(s, \Omega)}{ds} = -k_{a\lambda} I_\lambda(s, \Omega) - k_{s\lambda} I_\lambda(s, \Omega) + k_{a\lambda} I_{bl}(s, \Omega) + \frac{k_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(s, \Omega') \Phi(\Omega', \Omega) d\Omega' \quad (3)$$

边界条件为漫射、不透明边界

$$I_{\lambda, w}(\Omega) = n_{\lambda}^2 \epsilon_{\lambda, w} I_{bl, w} + \frac{1 - \epsilon_{\lambda, w}}{\pi} \int_{\pi_{w1}, \Omega' < 0} I_{\lambda, w}(\Omega') |a_{\lambda, w} \cdot \Omega'| d\Omega' \quad (4)$$

式中 s 为微元位置, $I_\lambda(s, \Omega)$ 代表介质内光谱辐射强度, λ 为光谱波长, $I_{bl}(s)$ 为黑体光谱辐射强度,

$I_\lambda(s, \Omega')$ 为 Ω' 方向投射的光谱辐射强度, $\Phi(\Omega', \Omega)$ 为散射相函数。 $k_{a\lambda}$ 、 $k_{s\lambda}$ 为介质光谱吸收系数、散射系数, $I_{\lambda, w}(\Omega)$ 为边界处光谱辐射强度, $I_{bl, w}$ 为边界黑体光谱辐射强度, $I_{\lambda, w}(\Omega')$ 为 Ω' 方向投射到边界的光谱辐射强度, $\epsilon_{\lambda, w}$ 为不透明材料光谱发射率, $a_{\lambda, w}$ 为边界外法向方向, Ω 、 Ω' 为光谱入射、散射方向角; n_λ 为折射率。本文辐射-导热耦合传热过程采用有限体积法(FVM)法求解,辐射热流密度采用蒙特卡罗法求解。

本文离散网格为内节点法,其介质内节点离散示意图如下图2所示。以相邻3个节点 W 、 P 、 E 为例,节点距离为 δx_w 、 δx_e ,节点中心线构成微元体界面 w 、 e 。本文反演计算中网格数为50,其既保证网格无关性,又可缩短计算时间。

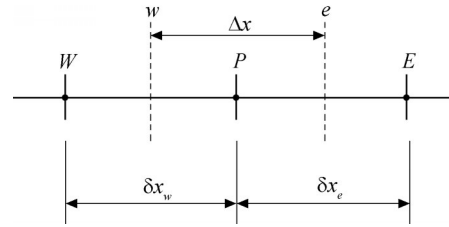


图2 网格划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of grid division

一维多层平板采用全隐格式离散,而内热源项辐射热流密度 q_r 为未知函数,故需进行局部线性化处理,即微元源项变为 $\Psi = S_c + S_p T_P$,其中 S_c 为常数部分, S_p 为斜率,最终式(1)离散格式变为

$$(\rho c)_p \Delta x (T_P - T_P^0) = \left[\frac{\kappa_e (T_E - T_P)}{\delta x_e} - \frac{\kappa_w (T_P - T_W)}{\delta x_w} \right] \Delta t + (S_c + S_p T_P) \Delta t \quad (5)$$

式中 T_P 、 T_E 、 T_W 代表节点中心节点及相邻前后节点温度, T_P^0 代表上一时刻中心点温度。 κ_e 与 κ_w 代表边界相邻单元导热系数的调和平均值。 $(\rho c)_p$ 为微元密度、比热容, Δt 为离散时间步长。

本文辐射传输方程采用蒙特卡罗法,该模型优点是可避免了对方向角的处理从而具备很高的精度。能量在半透明介质中传输会在三维空间内发生吸收、散射、反射、折射等过程。蒙特卡罗法则基于各体元、面元辐射传输过程建立概率模型,并统计能量光子的归宿,从而确定其微元辐射能量的传输,具体过程参见文献[20]。本模型为非灰体模型,因此对光谱辐射特性采用谱带近似法

求解,将全波长内相近的辐射特性做积分平均并视为常数,从而将各谱带视为灰体求解。本概率模型光子数设定为 10^5 。如图 3 所示,光子在半透明介质三维空间内传播,为对应到一维模型中,其光子传输终点坐标 x_1 为光子位置在样件法向的投影并进行统计,即

$$x_1 = x_0 + l_1 \cos \theta \quad (6)$$

式中 x_0 、 x_1 为起点、终点位置, θ 为天顶角, l_1 为光子衰减距离,满足贝尔定律

$$l_1 = -k_e^{-1} \cdot \ln(1 - R_s) \quad (7)$$

式中 k_e 为衰减系数, R_s 为随机数。

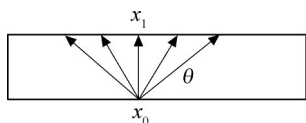


图 3 光子位置投影示意图

Fig.3 Scheme of photon position projection

各微元的辐射能量分配通过辐射传递因子 $R(i, j)$ 表示,根据 $R(i, j)$ 可求解各微元的辐射源项。

为方便编程计算,体元的辐射传递因子处理为式(8),其表示微元 j 对 i 的辐射传递因子。

$$R^*(i, j) = 4n_i^2 k_{a,i} dV_i \cdot R(i, j) \quad (8)$$

同理,面元的辐射传递因子处理为下式

$$R^*(i, j) = \epsilon_i n_i^2 dA_i \cdot R(i, j) \quad (9)$$

式中 R^* 为归一化辐射传递因子, n_i 为微元折射率, $k_{a,i}$ 为微元吸收系数, ϵ_i 为微元发射率, dV_i 、 dA_i 分别为微元体积元与微元面积元。

最终其辐射源项为

$$\Psi_i = \sigma \sum_{m=1}^{M_b} \left[\sum_j R^*(j, i) T_j^4 - \sum_j R^*(i, j) T_i^4 + \sum_j R^*(j, i) T_j^4 - \sum_j R^*(i, j) T_i^4 \right] = \sigma \sum_{m=1}^{M_b} \sum_j [R^*(j, i) T_j^4 - R^*(i, j) T_i^4] \quad (10)$$

式中 Ψ_i 为离散微元辐射源项能量, σ 为黑体辐射常数, T_i 、 T_j 为微元 i 、 j 的温度, M_b 为谱带分隔数, M_v 为体元个数, M_s 为面元个数, M_t 为体元、面元之和, $M_t = M_v + M_s$ 。

结合式(5)可知辐射源项可线性化为

$$\Psi_i = \sum_{m=1}^{M_b} \sum_j R^*(j, i) \sigma T_j^4 - \left[\sum_i R^*(i, j) \sigma T_i^3 \right] T_i \quad (11)$$

$$S_c = \sum_{m=1}^{M_b} \sum_j R^*(j, i) \sigma T_j^4 \quad (12)$$

$$S_p = - \sum_{m=1}^{M_b} \sum_j R^*(i, j) \sigma T_i^3 \quad (13)$$

通过式(12)、式(13)将辐射源项耦合入式(5)中进行离散求解即可获取多层结构温度场等信息。

1.2 基于遗传算法的反问题

本文通过遗传算法反演石英窗口导热系数,遗传算法是以自然界的生物进化过程为背景,将自然界种群的繁殖、选择、交叉、自然选择等进程引入算法中,是一种对问题进行高效全局搜索并自适应控制搜索方向最终收敛的方法。

对于辐射-导热耦合方程的反演,其导热系数反演一般流程如图 4 所示。为反演辨识不同温度下导热系数,本文假设导热系数在 100 K 温度间隔内呈线性变化,因此在 300~1 100 K 内导热系数辨识简化为求解 300、400、500、...、1 100 K 等 9 个温度节点的导热系数,其他温度范围内参数可进行线性插值。9 个待反演导热系数参数构成遗传算法初始种群,其可表示为 $\{\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_h\}_{N_p}$, h 代表反演个数, N_p 表示种群数。将搜索域内的导热系数代入到正问题中求解中间温度,通过定义收敛函数

$$J = \frac{1}{N_t} \left(\sum_{i=1}^{N_t} |T_{\exp}(i) - T_{\text{sim}}(i)| / T_{\exp}(i) \right) \quad (14)$$

可比较中间温度实验值与理论模拟值的误差, $T_{\exp}(i)$ 、 $T_{\text{sim}}(i)$ 分别代表实验温度与理论模拟温度, N_t 代表实验时间点。当 J 达到一定精度时即视为收敛,本文在收敛函数 $J \leq 10^{-3}$ 时视为收敛,若 J 未达到收敛精度则进行下一代的计算直到完成最大遗传代数为止。本文遗传算法种群数 $N_p = 100$, 最大进化代数 $N_q = 100$, 导热系数 κ 搜索域为 $1.0 \leq \{\kappa\}_{N_p} \leq 4.0$ 。

1.3 计算程序验证

本文计算了脉冲激光加热吸收、各向同性散射性介质时背面温度分布,并基于文献[21]验证了该程序正确性。其中介质为厚度 $L = 0.01$ m、初始温度 $T_0 = 1\,000$ K 的平板,周围黑体环境温度为 800 K,表面传热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,表面不透明。在 $t = 0$ s 时刻,平板一侧受激光辐照加热,入射激光波长为 $9.6 \mu\text{m}$,能量密度为 $300 \text{ kW}/\text{m}^2$,脉冲持续时间为 1 s;材料导热系数为 $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,比定容热容 $c_v = \rho c_p = 2.2 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

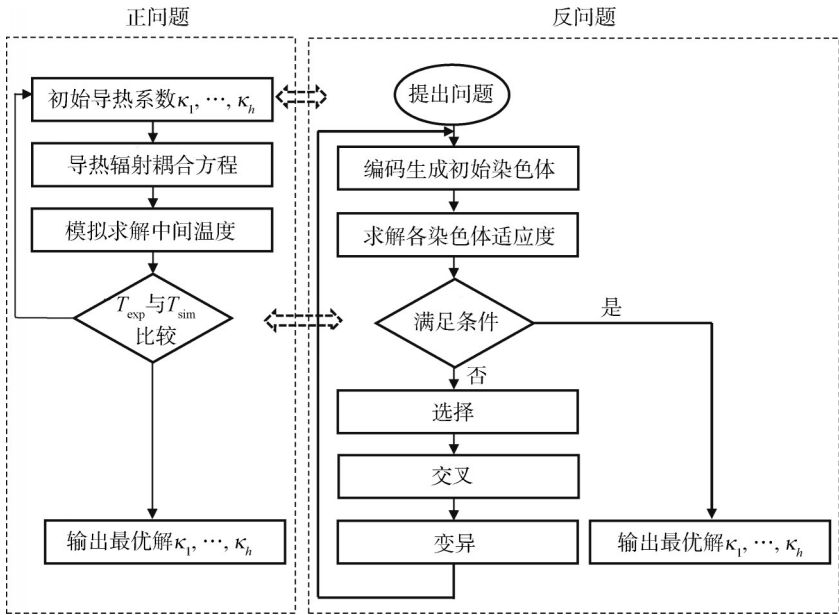


图 4 遗传算法反演模型

Fig.4 Model of genetic algorithm inversion

表 1 为不同谱带内半透明材料的辐射物性参数。本文模拟了散射反照率 $\omega_s=0$ 和 $\omega_s=0.9$ 情况下背面温度分布,如图 5 所示,本文所得结果与文献[21]中数据符合较好,由此证明本模型对非灰介质的适用性。

表 1 半透明平板的谱带辐射特性参数^[21]

Table 1 Radiation parameters of semitransparent flat plate in different spectral band^[21]

波长/ μm	折射率	光谱吸收系数/ m^{-1}
0.5~1.0	1.5	10
1.0~2.7	1.5	100
2.7~4.3	1.5	1 000
4.3~10.3	1.5	10 000
10.3~50.0	1.8	10 000

1.4 辐射物性对耦合传热特性的影响分析

通过非灰一维辐射-导热耦合模型,本文分别计算了不同吸收系数与折射率对耦合传热温度场的影响,该模型中导热系数、比热容、密度视为常数,其热扩散率 $\alpha=4\times10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$,热面温度为 1 000 K,冷面温度为 500 K,平板厚度为 1 m,时间步长为 2.5 s,换热时长为 1 000 s。

图 6(a)为吸收系数分别为 1、10、100、1 000、10 000 m^{-1} 以及不考虑辐射作用下 1 000 s 时的不同位置处的温度场。由图可知,在导热系数恒定情况下,吸收系数越小,相同位置处温度越高,这

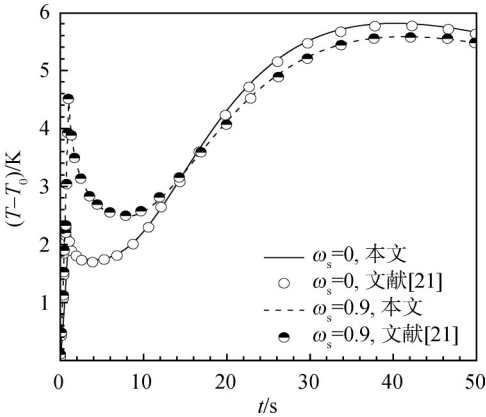
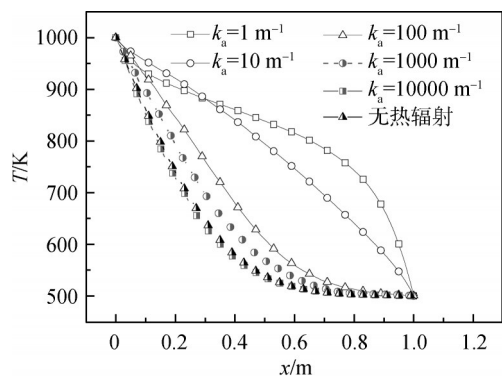


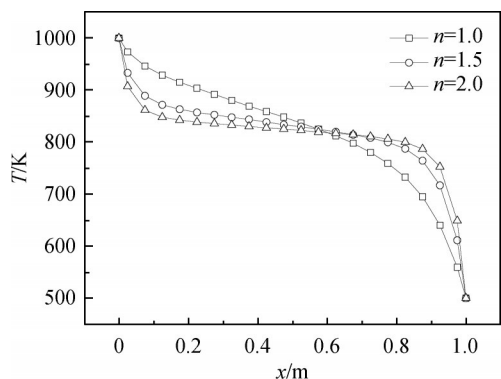
图 5 非灰体辐射-导热耦合传热模型验证

Fig.5 Verification of radiative and conductive heat transfer model for non-gray body

是由于高温下能量传输不仅为导热,还存在热辐射作用。由贝尔定律可知,衰减系数 k_{ca} 越小辐射能量在介质内传输距离越远,其对温度提升效果越明显。对于纯吸收无散射材料 $k_{\text{ca}}=k_{\text{a}}$,当吸收系数 $k_{\text{a}}=1.0\text{ m}^{-1}$ 时,其衰减较小,因此温度场变化较为平缓,平板低温侧温度场比纯导热有明显提升。而当吸收系数越大时,辐射衰减距离越短,其在起始位置辐射能量已被吸收。当吸收系数在 10 000 m^{-1} 左右时,其温度场与纯导热工况相差不大,此时辐射能量在很短距离已经被吸收。图 6(b)为平度场,该工况下吸收系数为 1 m^{-1} ,外界折射率 n 视为 1.0。由图可知折射率越大时,平板两侧温度板折射率在 1.0、1.5、2.0 下的温场变化



(a) 不同吸收系数下温度场



(b) 不同折射率下温度场

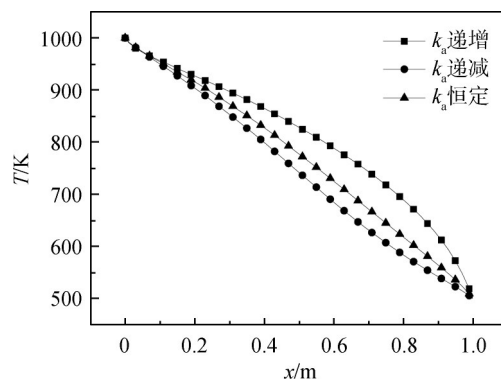
图6 辐射物性对耦合传热影响

Fig.6 Effect of radiation properties on coupled heat transfer

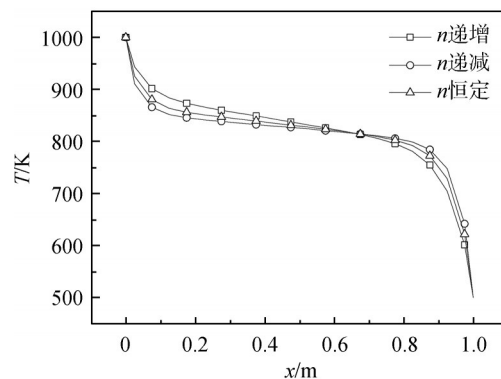
越陡。对于半透明界面,环境透射辐射为 G ,反射率为 r 时,其内部辐射强度 $I_g = (1-r)Gn_g^2/n_0^2$,环境折射率 $n_0=1$ 。由此可知,介质折射率 n_g 越大,其介质辐射能量越少,其对内部温度影响也变小。

图7(a)、图7(b)分别为吸收系数与折射率随谱带变化时对辐射导热耦合传热的影响,其热物性与上文相同,辐射物性参数设定见表2。表2算例1~算例3对应图7(a),3个算例下,折射率不变而吸收系数随谱带分别呈递增、递减、不变等分

布,算例4~算例6对应图7(b),其光谱折射率随谱带呈递增、递减、不变等3种趋势。图7(a)为吸收系数随谱带变化时平板温度场的变化,其吸收系数平均值相等,然而吸收系数随谱带递增时平板非加热侧温度提升较多,反之吸收系数递减时,平板温度较低,由此可知高温侧吸收系数大小对温度场影响较大。图7(b)反映折射率随谱带变化时对平板温度场的影响,由图可知高温侧折射



(a) 变吸收系数对平板温度场影响



(b) 变折射率对平板温度场影响

图7 随谱带变化的辐射物性对换热影响

Fig.7 Effect of band-dependent radiation properties on heat transfer

表2 平板内辐射物性参数

Table 2 Parameters of radiation properties in plate

图	算例	参数	变量	谱带 0~5/ μm	谱带 5~10/ μm	谱带 10~15/ μm	谱带 15~20/ μm
7(a)	1	$n=1.625$	$k_{a\lambda}$	5	10	15	20
	2		$k_{a\lambda}$	20	15	10	5
	3		$k_{a\lambda}$	12.5	12.5	12.5	12.5
7(b)	4	$k_{a\lambda}=12.5$	n_λ	1.25	1.50	1.75	2.00
	5		n_λ	2.00	1.75	1.50	1.25
	6		n_λ	1.625	1.625	1.625	1.625

率较大时,平板两侧温度梯度越大。由此可知,介质光谱选择性对高温辐射导热传递有较大影响。在真实导热系数反演中考虑光谱选择性影响可提升计算精度。

2 热响应测量及导热系数辨识

本文旨在通过高温瞬态热响应实验,结合辐射-导热耦合模型反演求解石英窗口导热系数。首先通过实验获取石英窗口辐射物性、热物性。本文基于傅里叶红外光谱仪 (FTIR) 测量石英窗口法向-法向透射比,反演获得其折射率及吸收系数^[22],基于谱带近似法,各谱带分隔波长及折射率、吸收系数见表 3 所示。石英窗口密度、比热容分别通过电子天平、差示扫描量热 (DSC) 仪器测量。密度为 2 203.9 kg/m³,比定压热容拟合公式为 $c_p=425.8-(T-273.4)^{0.148}$ J/(kg·K)。

表 3 石英窗口各波长范围内辐射物性参数

Table 3 Radiation property parameters of quartz window in each wavelength range

波长范围/μm	折射率	吸收系数/m ⁻¹
0.50~0.85	1.50	1.960
0.85~1.35	1.45	2.452
1.35~1.45	1.45	7.794
1.45~2.10	1.45	2.194
2.10~2.30	1.45	28.726
2.30~2.50	1.45	15.108

另外,石墨板密度、比定压热容、导热系数等物性参数分别通过实测获得,密度为 1 800 kg/m³,300~1 100 K 下导热系数和比定压热容随温度变化的拟合公式为

$$\kappa_s(T)=0.088\,25T+94.276\,62\quad (15)$$
$$c_{ps}=1\,623.716-2\,640.015\times 0.996\,66^T\quad (16)$$

本文基于高温热响应装置测量了石英窗口+石墨板+石英窗口三明治结构的瞬态温度响应,该实验在气压 10 kPa 下的氮气气氛下进行,其可防止高温氧化的影响。三层结构阳面通过带有电加热器的石墨均温板均匀施加一维热响应,两侧安装热电偶记录温度变化作为模型边界条件,中间热电偶记录的温度作为反演基准值。图 8 分别为 10 mm+10 mm 石英窗口在 1 100 K 和 20 mm+20 mm 石英窗口在 1 100 K 下温度响应图,图中 T_{bw} 表示热面温度, T_{bm} 表示中间温度, T_{be} 表示冷

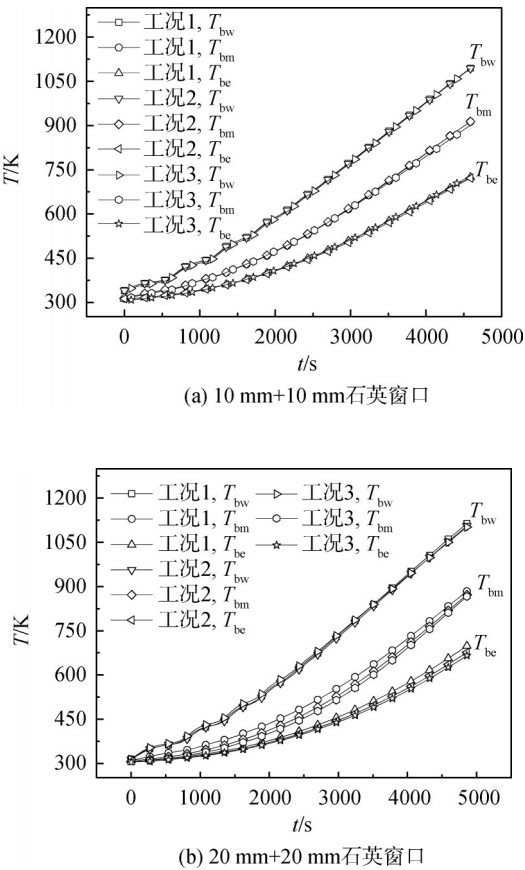


图 8 不同组合样品高温瞬态热响应曲线
Fig.8 High temperature transient thermal response curves of different combination samples

面温度。为保证实验正确性,两种组合分别测量 3 组实验,图 8(a)为 10 mm+10 mm 组合工况下石英窗口温度响应,该工况下 3 组实验温度重复性较好,高温处最大温度偏差低于 15 K;图 8(b)为 20 mm+20 mm 组合工况下石英窗口温度响应略差,3 组实验最大偏差低于 20 K。两种工况相比,20 mm+20 mm 组合石英窗口温度响应比 10 mm+10 mm 组合响应慢,热面温度达到 1 100 K 时,10 mm+10 mm 冷面侧平均温度为 724.78 K,而 20 mm+20 mm 冷面侧平均温度为 669.62 K,温度响应随厚度增加而变缓符合辐射-导热理论。通过重复性实验及热响应曲线变化可判断该实验准确性。本实验热电偶精度满足 $\max[2.2, 0.75\% \cdot T(K)]$,经误差分析,10 mm+10 mm 测试结果不确定度最大为 5.38%,20 mm+20 mm 测量结果最大不确定为 9.79%。

将所测的石英窗口辐射折射率、吸收系数、密度、比热容等作为模型输入参数,基于石英窗口的 1 100 K 下的温度热响应测试,通过遗传算法反演

了石英窗口导热系数,为减小误差,热响应温度为3组实验平均值。两侧温度 $T_{bw}(t)$ 与 $T_{be}(t)$ 为变温边界条件,取 $t=0$ s时刻温度 $T_{bw}(t)|_{t=0}$, $T_{be}(t)|_{t=0}$ 平均值为初始条件。本文首先基于所建模型反演了该石英窗口本征导热系数 κ_c ,为研究其与传统导热系数获取差别,本文亦求解有效导热系数 κ_{eff} ,传统导热系数测定很少考虑辐射影响,由式(1)可知源项 $q_r=0$,此时在边界温度已知情况下,其辐射对传热的影响被等效为导热影响,式(1)变为

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (17)$$

此时有效导热系数 κ_{eff} 由本征导热系数 κ_c 和等效辐射导热系数 κ_r 组成,即

$$\kappa_{eff} = \kappa_c + \kappa_r \quad (18)$$

图9为常温到1100 K下的两种组合形式下石英窗口导热系数。本文获得的导热系数结果与Combis等^[23]结果符合较好,通过拟合该材料本征导热系数与温度的关系满足

$$\kappa_c(T) = 1.147 + 5.20 \times 10^{-4} T + 7.060 \times 10^{-7} T^2 \quad (19)$$

若不考虑辐射影响,基于10 mm+10 mm实验数据,反演有效导热系数关联式满足

$$\kappa_{eff}(T) = 0.831 + 1.630 \times 10^{-3} T + 3.667 \times 10^{-7} T^2 \quad (20)$$

在400 K温度以下,由于温度较低石英窗口本征导热系数与有效导热系数相差不大,但在高温1100 K时,有效导热系数比本征导热系数大0.49左右。这是由于高温下半透明材料以辐射-导热耦合方式进行换热,其换热量高于纯导热工况的换热量。由图10可知随着温度升高,热辐

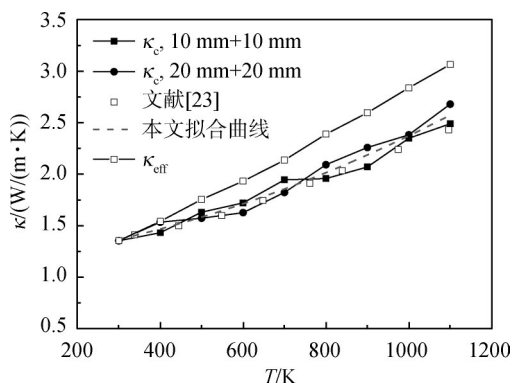


图9 石英窗口高温导热系数真值

Fig.9 Thermal conductivity of quartz window at high temperature

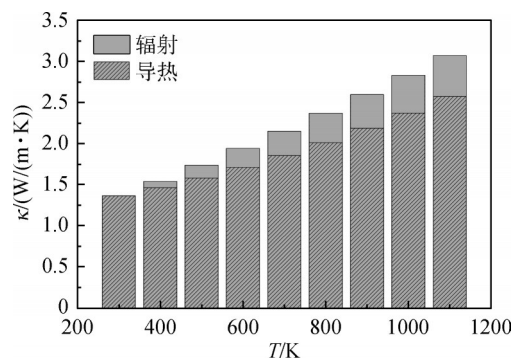
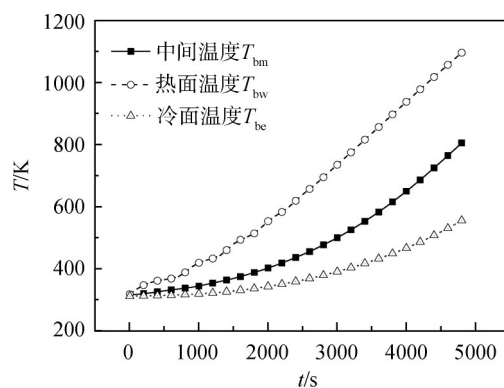


图10 辐射对导热系数测定的影响

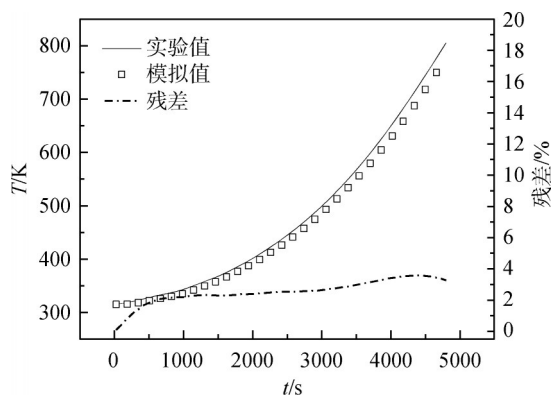
Fig.10 Effect of radiation on measurement of thermal conductivity

射对传热影响占比逐渐增大,在高温1100 K时,若以传统方法测定导热系数,辐射作用会使导热系数测定结果偏差16.12%。

为进一步验证导热系数结果的正确性,如图11(a)所示,本文测量了30 mm+30 mm石英窗口组合在1100 K的温度响应,基于瞬态温度响应求解了石英窗口-石墨板-石英窗口结构的内部温度场并与对应中间温度 T_{bm} 进行比较,由图11(b)可



(a) 30 mm+30 mm热响应曲线



(b) 中间温度曲线验证

图11 导热系数验证

Fig.11 Thermal conductivity verification

可知该实验值与模拟值曲线基本吻合,最大偏差小于4%。由此可证明本文基于高温瞬态实验测量辨识的导热系数可信度较高。

3 结 论

本文基于瞬态法提出了石英窗口等半透明材料多温度点导热系数同时反演方法。建立了一维非灰辐射导热耦合模型及遗传算法反演模型,通过高温瞬态响应实验装置获取石英窗口瞬态温度响应,结合理论模型获得了石英窗口高温导热系数,并验证其准确性。

通过模拟比较了辐射物性对耦合换热温度场的影响,研究表明高温侧吸收系数、折射率对平板温度场影响较大,吸收系数越大,内部温度与纯导热工况下相差越小,折射率越大平板两侧温度梯度越大。

对石英窗口-石墨板-石英窗口多层结构高温热响应进行了多次实验测量,并辨识求解了石英窗口的高温本征导热系数,300~1 100 K下导热系数介于1.353~2.584 W/(m·K)之间,通过多项式拟合获得关系式为 $\kappa_c(T)=1.147+5.2\times 10^{-4}T+7.06\times 10^{-7}T^2$ 。随着温度升高,该材料辐射作用对有效导热系数测定结果占比逐渐增大,在1 100 K下其辐射影响占比为16.12%。

参考文献:

- [1] 戴贵龙,夏新林,于明跃.石英窗口太阳能吸热腔热转换特性研究[J].工程热物理学报,2010,31(6):1005-1008.
DAI Guilong, XIA Xinlin, YU Mingyue. Study on thermal conversion characteristics of quartz window solar cavity[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(6): 1005-1008. (in Chinese)
- [2] 黄名海,臧树升,葛冰,等.热风洞中涡轮叶片温度场红外热像测量方法[J].航空动力学报,2014,29(11):2679-2683.
HUANG Minghai, ZANG Shusheng, GE Bing, et al. Infrared thermal image measurement method of turbine blade temperature field in thermal wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(11): 2679-2683. (in Chinese)
- [3] 倪瑞沪,高志山,袁群,等.光学窗口的热光学分析与优化方法研究[C]//第十七届全国光学测试学术交流会摘要集.吉林 长春:中国光学学会光学测试专业委员会,2018:39.
- [4] 葛银娟,潘兴臣,刘诚,等.基于相干调制成像的光学检测技术[J].物理学报,2020,69(17):265-272.
GE Yinjuan, PAN Xingchen, LIU Cheng, et al. Optical detection technology based on coherent modulation imaging[J]. Acta Physical Sinica, 2020, 69(17): 265-272. (in Chinese)
- [5] WANG Shuai, AI Qing, ZOU Tianqi, et al. Analysis of radiation effect on thermal conductivity measurement of semi-transparent materials based on transient plane source method[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 177: 115457.1-115457.9.
- [6] ZHANG Hu, LI Yueming, TAO Wenquan. Effect of radiative heat transfer on determining thermal conductivity of semi-transparent materials using transient plane source method[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 337-345.
- [7] SU G P, QIU L, ZHENG X H, et al. Effective thermal-conductivity measurement on germanate glass-ceramics employing the 3ω method at high temperature[J]. International Journal of Thermophysics, 2014, 35(2): 336-345.
- [8] BITYUKOV V K, PETROV V A, STEPANOV S V. Determination of the coefficient of thermal-conductivity of silica glass by the contactless flat-plate method at 900—1 500-degrees-K[J]. Institute for High Temperatures, 1983, 21(6): 840-847.
- [9] SHIBATA H, OHTA H, SUZUKI A, et al. Applicability of platinum and molybdenum coatings for measuring thermal diffusivity of transparent glass specimens by the laser flash method at high temperatures[J]. Materials Transactions JIM, 2000, 41(12): 1616-1620.
- [10] LAZARD M, ANDRÉ S, MAILLET D. Diffusivity measurement of semi-transparent media: model of the coupled transient heat transfer and experiments on glass, silica glass and zinc selenide[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(3): 477-487.
- [11] 刘玉英, THOMAS K, 张欣欣. 闪光法测量半透明材料热扩散率的理论研究[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(7): 681-686.
LIU Yuying, THOMAS K, ZHANG Xinxin. Theoretical study on measurement of thermal diffusivity of translucent materials by flash method[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2006, 28(7): 681-686. (in Chinese)
- [12] 谈和平,余其铮,米歇尔·拉勒芒.求半透明材料导热系数的复合换热反问题[J].航空动力学报,1991,6(3):275-278,285.
TAN Heping, YU Qizheng, MICHELLE L. Inverse problem of composite heat transfer for calculating thermal conductivity of translucent materials[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(3): 275-278, 285. (in Chinese)
- [13] 赵淑媛.纤维隔热材料微观结构与热性质演化及热可靠性评估研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
ZHAO Shuyuan. Microstructure and thermal property evolution and thermal reliability evaluation of fiber insulation materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] 何飞,赫晓东,赵淑媛.纤维隔热毡有效热导率测试方法研究[J].宇航材料工艺,2007,37(5):67-70.
HE Fei, HE Xiaodong, ZHAO Shuyuan. Study on test method of effective thermal conductivity of fiber insulation felt[J]. Aerospace Material and Technology, 2007, 37(5): 67-70. (in Chinese)
- [15] DAS R, MISHRA S C, UPPALURI R. Retrieval of thermal properties in a transient conduction radiation problem with

- variable thermal conductivity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(11/12):2749-2758.
- [16] DAOUAS N. An alternative sensitivity method for a two-dimensional inverse heat conduction-radiation problem based on transient hot-wire measurements[J]. *Numerical Heat Transfer Fundamentals*, 2018, 73(2):106-128.
- [17] MIRONOV R A, ZABEZHAIOV M O, CHERE-PANOV V V, et al. Transient radiative-conductive heat transfer modeling in constructional semitransparent silica ceramics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 1230-1238.
- [18] 刘华. 纳米复合隔热材料高温耦合传热实验测量及物性参数辨识[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- LIU Hua. Experiment on coupled heat transfer and thermal property identification of nano-composite insulation at high temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [19] YEH C L, WEN C Y, CHEN Y F, et al. An experimental investigation of thermal contact conductance across bolted joints[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 25(6): 349-357.
- [20] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [21] TAN H, RUAN L, TONG T W. Temperature response in absorbing, isotropic scattering medium caused by laser pulse[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(2): 311-320.
- [22] ZHANG S D, SUN F X, XIA X L, et al. Multi-layer-combination method to retrieve high temperature spectral properties of C-plane sapphire[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 121:1011-1020.
- [23] COMBIS P, CORMONT P, GALLIAIS L, et al. Evaluation of the fused silica thermal conductivity by comparing infrared thermometry measurements with two-dimensional simulations[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(21):211908.1-211908.4.

(编辑: 陈 越)