

求半透明材料导热系数的复合换热反问题*

哈尔滨工业大学

谈和平**

余其铮

法国普瓦蒂埃国立高等机械及航空技术学校

米歇尔·拉勒芒

【摘要】 在激光脉冲法测不透明材料导热系数的基础上, 本文提出了一种已知半透明材料辐射特性, 求其导热系数的复合换热反问题方法。数值模拟实验表明, 此方法是可行的。

用激光脉冲法测定非透明材料导热系数已有成功的应用^[1], 但对于半透明材料, 由于内部辐射作用, 用此方法还有一定困难, 至今尚未发现这方面的文献。本文采用辐射与导热非稳态复合换热模型^[2,3], 提出一种在已知半透明材料光学特性条件下, 反演其导热系数的辐射与导热复合换热反问题方法。

一、物理模型

一块一维的半透明材料, 两表面 S_1 及 S_2 涂黑, 为不透明界面。 S_1 面受到激光脉冲加热, 两表面都受到对流辐射冷却。将平板沿厚度方向分成 $NM-2$ 个薄层 (控制体), 用结点 i 表示,

$i=1, NM$ 分别为表面结点 S_1 和 S_2 ^[2]。考虑导热系数随温度变化, 其隐式离散化能量方程为

$$C \Delta x (T_i^{m+1} - T_i^m) / \Delta t = [k_{ie}^{m+1} (T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}) + k_{iw}^{m+1} (T_{i-1}^{m+1} - T_i^{m+1})] / \Delta x + \Phi_i^{m+1} \quad (1)$$

式中: C 为单位体积热容; Δx 为控制体厚度; T 为绝对温度; Δt 为时间间隔; Φ 为辐射热源; k_{ie} , k_{iw} 分别为采用调和平均时, 界面 ie (在结点 i 和 $i+1$ 间), iw ($i-1$ 和 i 间) 的导热系数。考虑材料对辐射的选择性, 用一组矩型谱带模型近似之, 共分 NB 个谱带。考虑谱带模型, S_1 面的边界条件为

$$\sigma \sum_{m=1}^{NB} n_m^2 \left\{ \epsilon_{1,m} (S_1 S_2)_m (a_{m,T_{NM}} T_{NM}^4 - a_{m,T_1} T_1^4) + \sum_{j=2}^{NM-1} \epsilon_{1,m} (S_1 V_j)_m (a_{m,T_j} T_j^4 - a_{m,T_1} T_1^4) \right\} + 2k_2(T_2 - T_1) / \Delta x = \sigma \sum_{m=1}^{NB} \epsilon_{1,m} (a_{m,T_1} T_1^4 - a_{m,T_\infty} T_\infty^4) + h_1(T_1 - T_\infty) - \epsilon_{1,\lambda_a} q_{la} \quad (2)$$

式中: $a_{m,T_i} = \int_{\Delta \lambda_m} I_{\lambda}(T_i) d\lambda \left/ \left(\int_0^\infty I_{\lambda}(T_i) d\lambda \right) \right.$ 为结点温度 T_i 下, m 谱带内黑体辐射能占总辐射能的份额; σ 为波尔茨曼常数; n 是材料折射率; ϵ_1 为 S_1 面发射率; T_∞ 为环境温度; h_1 为 S_1 面换热系数; ϵ_{1,λ_a} 是入射激光波长为 λ_a 时 S_1 面的发射率; q_{la} 是入射激光能流密度, 如投射在表面 S_1 上的持续时间为 t_{la} , 则

$$t \leq t_{la} ; \quad q_{la} = const ; \quad t > t_{la} , \quad q_{la} = 0 \quad (3)$$

S_2 面的边界条件与 S_1 面类似, 只是 $q_{la} = 0$ 。辐射热源项可用光线踪迹法得

$$\Phi_i = \sigma \sum_{m=1}^{NB} \left\{ \begin{aligned} & \left(\epsilon_{1,m} (S_1 V_i)_m (a_{m,T_1} T_1^4 - a_{m,T_i} T_i^4) + \epsilon_{2,m} (S_2 V_i)_m (a_{m,T_{NM}} T_{NM}^4 - a_{m,T_i} T_i^4) \right. \\ & \left. + \sum_{j=2}^{NM-1} (V_i V_j)_m (a_{m,T_j} T_j^4 - a_{m,T_i} T_i^4) \right) \end{aligned} \right\} \quad (2 \leq i \leq NM-1) \quad (4)$$

(2)、(4) 式中 $(S_1 S_2)_m$, $(S_i V_j)_m$ 及 $(V_i V_j)_m$ 分别为在 m 谱带内表面与表面, 表面与控制体, 控制体与控制体的辐射总交换系数, 计算式见文献 [2]。

二、正问题计算及表面温度响应特点

如给出上述各物性及边界条件, 用以上诸方程, 可算出试件内各点的温度响应。数值计算方法和步骤见文献 [3]。计算出的 S_1 和 S_2 面的温度响应可作为数值模拟反问题的“测量数据”。图 1 所示的算例中, 试件初始温度 $T_o = 1000\text{K}$; 环境温度 $T_\infty = 1000\text{K}$; $T(t) - T_o$ 为过余温度; 厚度 $d = 0.01\text{m}$; $k = 1.5\text{W}/(\text{mk})$; $h_1 = h_2 = 0$; $C = 2.2 \times 10^6 \text{J}/(\text{m}^3\text{k})$; $q_{la} = 50000\text{W}/\text{m}^2$; $t_{la} = 1\text{s}$ 。材料的谱带模型见表 1, 表中 λ 为波长 (μm); κ 为吸收系数 (m^{-1}); 两侧为黑表面。为比较起见, 图中还列出曲线 C , 表示不透明材料的温度响应。

表 1 谱带模型

λ	n	κ
0.5~2.7	1.5	10
2.7~4.5	1.5	1000
4.5~50.0	1.5	5000

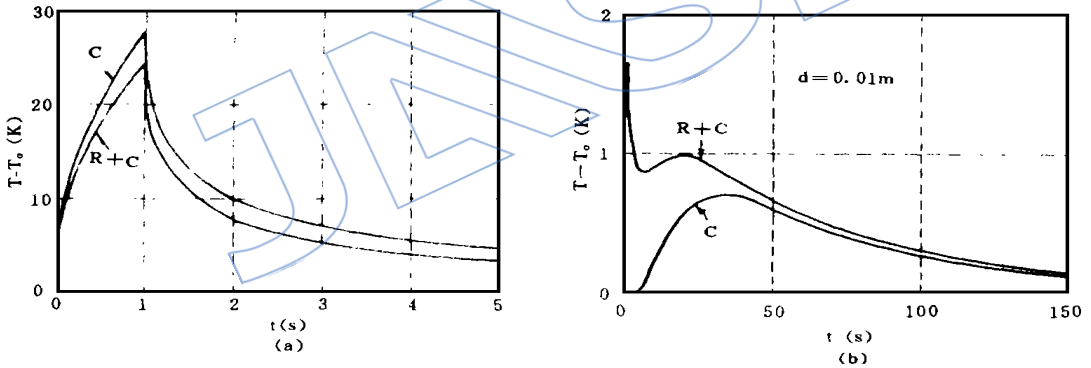


图 1 半透明 ($R+C$) 与不透明 (C) 材料 s_1 、 s_2 面上过余温度响应的比较

(a. 入射面 s_1 , $\xi = 0$ b. 非入射面 s_2 , $\xi = 1$)

从图 1 中可看出, 半透面与不透明材料除温度不同外, 在非入射面 ($\xi = x/d = 1$) 温度响应曲线出现两个峰值。第一个峰值处于 $t = t_{la}$, 这是投射辐射穿透介质的能量直接加热的结果。当 $t > t_{la}$ 时, 由于 $q_{la} = 0$, 故温度下降。第二个峰值形成原因与不透明材料类似, 是传来的能量 (主要是导热) 大于面上的散热所致。

三、反问题方法求导热系数的数值模拟

反问题中的已知量除导热系数为未知数外, 其他的和正问题相同, 另外还需增加两个补充已知量 S_1 和 S_2 面的过余温度 θ_1^* 和 θ_2^*

$$\theta_1^*(t) = T(\xi = 0, t) - T_o, \quad \theta_2^*(t) = T(\xi = 1, t) - T_o, \quad t > 0$$

予先估计一导热系数猜值 k_i , 通过正问题计算可得 S_1 及 S_2 面 t 时刻过余温度计算值 θ_1

(k_i, t) 及 $\theta_2(k_i, t)$ 。考虑到过余温度 θ_2 一定小于 θ_1 , 故本文中 θ_2 作为已知条件代入方程, 仅将 θ_1 作为约束条件。由此可得 θ_1 的计算值与测量值之差

$$Y(k_i, t) = |\theta_1^*(t) - \theta_1(k_i, t)|$$

如 $Y(k_i, t)$ 趋近于零, 则 k_i 即为最佳解。

实际计算时, 先估计一导热系数猜值区域 $[a, b]$, 然后采用黄金分割法, 在 $[a, b]$ 区内适当插入两点 k_j, k_l (设 $k_j < k_l$), 通过比较 $Y(k_j, t)$ 和 $Y(k_l, t)$, 删去小于 k_j 或大于 k_l 的区域, 选择下一个搜索区, 如此不断地缩小搜索区间, 一直到 $|k_j - k_l|$ 小于事先给定的正的小参数 Δ (本文所有算例中, $\Delta = 0.000001$), 即可找到 $Y(k_j, t)$ 的最小值, 即可认为此时 $\theta_1(k_j, t) = \theta_1^*(t)$, 对应的 k_j 即为反问题的最佳解。对于不透明介质由于无辐射源项, 可少一个附加条件, 只需测一个面的温度作为约束条件即可^[4]。为检验此方法的可行性, 本文采用了数值模拟, 步骤如下:

(1) 正问题 给出所有的物性参数 (包括导热系数 k^*) 及加热的热流密度, 求解原问题 (1) 式, 得温度响应 $\theta_1^*(t), \theta_2^*(t)$, 生成“测量数据”。

(2) 反问题 将导热系数 k 作为未知数。模拟实测情况, 将“测量数据”加上适当误差 δ_1, δ_2 即

$$\theta_1 = \theta_1^*(1 + \delta_1), \quad \theta_2 = \theta_2^*(1 + \delta_2)$$

用反问题方法, 求 k 的近似值。

(3) 将反问题得到的 k , 与正问题给定的 k^* 比较, 检验方法的可行性。

在下面计算中, 除特别说明外, 试件都为黑表面; $d = 0.01\text{m}$; $T_o = T_\infty = 500\text{K}$; $C = 1 \times 10^6 \text{J}/(\text{m}^3\text{k})$; $t_{la} = 3\text{s}$; $h_1 = h_2 = 0$; $\Delta = 0.5\text{s}$; $q_{la} = 50000 \text{W}/\text{m}^2$ (Co_2 激光, $\lambda = 9.6\mu\text{m}$); $NM = 10$; 材料的光谱特性及谱带模型见表 1。

1. 定常导热系数辨识问题 在正问题计算中, 给定导热系数 $k^* = 1.5$ 。反问题计算中, 搜索范围为 $[0.5, 5]$, 对于不同测量误差 δ_1 和 δ_2 , 得到的计算结果见表 2。当测量误差 δ_1 和 δ_2 随机变化 (变化范围 $-5\% \sim +5\%$) 时, 得到的计算结果 $k = 1.233 \sim 1.750$, 然后采用数据处理方法, 如用平均值, 得 $k = 1.511927$ 。

表 2 不同测量误差 δ 下定常导热系数 k 的数值模拟结果

$t \text{ (s)}$	$\delta_1 = 0 \quad \delta_2 = 0$	$\delta_1 = 0.01 \quad \delta_2 = 0$	$\delta_1 = 0.03 \quad \delta_2 = 0$	$\delta_1 = \delta_2 = 0.05$	$\delta_1 = \delta_2 = -0.05 \sim +0.05$
0.5	1.49987	1.47487	1.42727	1.38178	1.38178 $\delta = +0.05$
1	1.49987	1.47137	1.41633	1.36470	1.68469 $\delta = -0.05$
1.5	1.49987	1.46959	1.41182	1.35693	1.31648 $\delta = +0.05$
2	1.50006	1.46873	1.40918	1.35290	1.75014 $\delta = -0.05$
2.5	1.49987	1.46834	1.40717	1.35002	1.70592 $\delta = -0.05$
3	1.50025	1.46772	1.40592	1.34762	1.23255 $\delta = +0.05$

2. 随温度线性变化的导热系数辨识问题 在正问题计算中, 给定导热系数 $k^* = k_o + \beta (T_i - 293) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, $k_o = 1.1$, $\beta = 0.000944835$ 。反问题计算中, 选择若干个 k_o 的搜索区 $[a, b]$, β 的搜索区 $[c, d]$, 求 k_o 和 β , 得到的计算结果见表 3。表 4 中给出不同测量误差 δ_1 和 δ_2 下的计算结果, 参数为 $T_o = T_\infty = 1000\text{K}$, $C = 2 \times 10^6 \text{J}/(\text{m}^3\text{k})$, $\Delta = 5\text{s}$, $q_{la} = 5000 \text{W}/\text{m}^2$ (Co_2) 激光, $t_{la} = 25\text{s}$, 其他同前。

表 3 不同搜索范围下随温度线性变化的导热系数的数值模拟结果
(I : $a=0.5$ $b=5$ $c=0.0001$ $d=0.005$; II: $a=0.2$ $b=2$ $c=0.00015$ $d=0.015$)

t	θ_1^*	k_2^*	I			II
			k_o	β	k_2	k_2
0.5	34.73926	1.32840	1.09948	$9.4668E-4$	1.32833	1.32716
1.0	46.76892	1.33977	1.09948	$9.4668E-4$	1.33972	1.33821
1.5	56.41565	1.34888	1.09948	$9.4668E-4$	1.34885	1.34740
2.0	64.54645	1.35657	1.09948	$9.4668E-4$	1.35655	1.35500
2.5	71.63470	1.36326	1.09948	$9.4668E-4$	1.36326	1.36152
3.0	77.95947	1.36924	1.09948	$9.4668E-4$	1.36924	1.36753

表 4 不同测量误差下随温度线性变化的导热系数数值模拟结果

$t(s)$	k_2^*	k_2		
		$\delta_1=\delta_2=0$	$\delta_1=\delta_2=0.01$	$\delta_1=\delta_2=0.03$
5	1.77171	1.77321	1.71737	1.61054
10	1.77300	1.77680	1.70772	1.57832
15	1.77386	1.77767	1.69996	1.55520
20	1.77454	1.77835	1.69458	1.53464
25	1.77511	1.78079	1.68874	1.51776

数值模拟实验表明，本方法可用于确定半透明材料的导热系数。(1) 在没有测量误差的情况下，数据模拟结果非常满意。(2) 反问题的计算结果的好坏与测量误差有关，并且在非稳态过程中，计算误差会逐渐累积，因此还需对数值结果采用数据处理方法进行整理。

参 考 文 献

[1] DEGIOVANNI A., LAURENT M., “Une Nouvelle Technique D’identification de la diffusivité thermique pour la méthode flash”, Rev. Phys. Appl. Vol 21, No 3 (1986).

[2] 谈和平、余其铮、迈克尔·拉勒芒, “高温下半透明介质内辐射与导热的非稳态复合换热”, 工程热物理论, Vol. 10, No 3 (1989)。

[3] TAN HEPING, LALLEMEND M., “Transient Radiative Conductive Heat Transfer in Flat Glasses Submitted to Temperature, Flux and Mixed Boundary Condition”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, No 5 (1989).

[4] 余其铮、王德明、周志明, “快速测定导热系数随温度呈线性变化的方法”, 哈尔滨工业大学学报, No 6 (1988)。

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDROGEN– AIR SUPERSONIC COMBUSTION

Liu Ling, Zhang Zheng, Tang Ming (*Northwestern Polytechnic University*)

Liu Jinghua, Yang Lixing, Wang Juzheng (*The 31th Research Institute*)

ABSTRACT

The experimental results of Hydrogen fueled supersonic combustors are considered. Tests were conducted with arc-heated air at inlet Mach number 2.1, total temperature 2100K, total pressure 7×10^5 Pa. The axisymmetric combustor with inlet of 4.6cm inner diameter has been investigated with hydrogen injected normally or parallelly to air stream from a ring of equally spaced holes on the wall. The combustor comprised assemblies of cylindrical and diverging conical sections on which are mounted static pressure taps and thermocouples. The total pressure profiles were measured by a pressure probe rake just downstream of the combustor exit. Each fuel injection persisted about 8 seconds to obtain steady-state operating conditions. The pseudo-one dimensional flow analysis of supersonic combustor has been improved and employed to yield a description of the bulk processes in the supersonic combustor and to explain the characters of the measured pressure distributions. The results of a series of tests show that the combustion efficiency of the transverse injection ahead of a rearward facing step is higher than behind it, and the combustion efficiency of transverse injection is higher than that of the downstream injection, and it is also evident that the total pressure loss is maximum in the case of transverse injection ahead of a rearward facing step and is minimum in the case of parallel injection.

AN INVERSE COUPLED HEAT TRANSFER METHOD FOR THERMAL CONDUCTIVITY SEMI-TRANSPARENT MATERIAL

Tan Heping and Yu Qizheng (*Harbin Institute of Technology*)

Lallemant Michel (*Laboratoire de Thermique ENSMA*)

ABSTRACT

An inverse problem method of transient combined radiative-conductive heat transfer is proposed to determine the thermal conductivity of non-gray semi-transparent material. The one-dimensional semi-transparent sample with black interfaces is submitted to an external rectangle pulsed irradiation and the temperature response occurs in the sample. There are two peaks in the temperature response of non-incident surface. The thermal conductivity can be determined by this method, provided that temperature responses at the two surfaces are measured and the radiative properties of semi-transparent material are known. The control volume method and the spectral band model are used in the numerical calculation. The divergence of radiative flux is treated as the source term of the energy equation. In the inverse problem method the golden section method is applied to searching for the optimum of the solution. The temperature response of the non-irradiated surface is taken as a given condition and the temperature response of the irradiated surface as a restricted condition. Two cases are considered, i. e. the case of constant thermal conductivity and the case of thermal conductivity varying with temperature in a linear relation. The numerical simulation has been carried out. It is proved that this method is feasible. The influences of the searching region and the measurement errors are also discussed in this paper.