

新型防热涂层热导率的参数辨识

姜贵庆 马志强 俞继军 王淑华

(中国航天空气动力技术研究院,北京 100074)

文 摘 成功的利用参数辨识的灵敏度法对防热涂层材料的热导率进行了参数估计。利用不同状态试验结果辨识的材料热导率对同类涂层材料是相同的或者接近相同,表明辨识的结果是可信的。把辨识的结果用于涂层材料热防护性能预测,与试验结果相符。

关键词 防热涂层,参数辨识技术,热防护

Parameter Identification of Thermal Conductivity Coefficient for New Type Coating Materials

Jiang Guiqing Ma Zhiqiang Yu Jijun Wang Shuhua

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

Abstract In this paper, the parameter identification of thermal conductivity coefficient for coating material is successfully completed using sensitivity method. The estimated results for different tests' conditions are almost the same, indicating that the estimated results are rational. Using identification results of the thermal conductivity coefficient, the prediction results of thermal protection performance for coating material corresponds to the test results.

Key words Thermal coating material, Parameter identification technique, Thermal protection

1 引言

新型防热涂层是航天飞行器的主要热防护材料之一,它的热防护性能预测难度很大。由于新型防热涂料是非均质薄层结构,在加热过程中,涂层本身要发生一系列物理化学变化,结果使涂层具有三种功能,在外层具有良好的抗氧化烧蚀功能、中间层具有良好的隔热功能、底层具有良好的与结构材料的粘接功能。预测防热涂层热防护性能有二个技术关键:(1)涂层材料的热防护机理,涂层材料的防热机理不同于常规的硅基、碳基及低密度碳复合材料^[1~2],文献[3~4]对涂层材料的防热机理进行了详尽的分析,这里不再赘述;(2)三层结构热导率的确定,难度很大。本文利用参数辨识灵敏度法对材料的热导率作了参数估计。

2 参数辨识方法

参数辨识方法对解决复杂的系统问题特别有效,

因此,广泛应用于自然科学、社会科学和工程设计实践中的各个领域。

参数辨识与系统分析是互逆的两种手段。通常系统分析称为正问题,而辨识称为逆问题或反问题。辨识的基本思想是根据系统的运作和试验测得的数据,按照给定的“系统等价准则”,从一群候选模型集合中,确定出一个与系统特性相等价的数学模型。参数辨识是一种反问题解法,它在气动热领域已有应用,其主要用于热流的参数辨识和均质材料的热物性参数辨识。目前,对于有热解反应的涂层材料进行参数辨识国内还没有人做过研究。

3 用灵敏度法对材料热导率的参数系统辨识

文献[5]在总结飞行器气动参数辨识研究的基础上,提出一种直接从状态方程中求得灵敏度方程,然后用差分方法计算状态参数和灵敏度,再用 Newton-Raphson算法对未知参数进行辨识的方法。

收稿日期:2008-04-17

作者简介:姜贵庆,1934年出生,研究员,主要从事气动热力学与热防护研究工作

3.1 有热解反应的热传导方程

考虑一维有热解反应的热传导方程为：

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{dK}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \dot{m}_p C_p \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1)$$

式中， ρ 为材料的密度， C_p 为材料的热容， T 为温度， K 为材料的热导率， y 为一维传热的坐标， \dot{m}_p 为涂层的热解质量损失率， \bar{C}_p 为热解气体的平均热容。

3.2 灵敏度方程

由一维有热解反应的热传导方程(1)，假定热导率 K 为温度的二次函数，则有：

$$K = a + bT + cT^2 \quad (2)$$

(1)式可化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho C_p} (b + 2cT) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{\dot{m}_p C_p}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3)$$

(3)式为系统状态方程。

辨识问题变为如何确定公式(2)中的三个待定参数， a, b, c ，为此需建立三个灵敏度方程。

引进 $u_1 = \frac{\partial T}{\partial a}, u_2 = \frac{\partial T}{\partial b}, u_3 = \frac{\partial T}{\partial c}$

u_1, u_2, u_3 称为灵敏度，(3)式对 a, b, c 求偏导，可得：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = A \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + B \frac{\partial u_i}{\partial y} + C u_i + D_i \quad (4)$$

式中：

$$A = \frac{1}{\rho C_p} K;$$

$$B = \frac{1}{\rho C_p} 2(b + 2cT) \frac{\partial T}{\partial y};$$

$$C = \frac{1}{\rho C_p} (b + 2cT) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + 2c \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2;$$

$$D_1 = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2};$$

$$D_2 = \frac{1}{\rho C_p} \left[T \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right];$$

$$D_3 = \frac{1}{\rho C_p} \left[T^2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + 2T \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right];$$

且 $i=1, u_i = u_1; i=2, u_i = u_2; i=3, u_i = u_3$ 。

3.3 辨识准则函数及其误差最小准则

引进辨识准则函数

$$J = \int_0^t [T(a, b, c, y^*, t) - Z(y^*, t)]^2 dt \quad (5)$$

式中， $T(a, b, c, y^*, t)$ 为满足状态方程的解； $Z(y^*, t)$ 为观察值， Z 可表示为 $Z = T(y^*, t) + \epsilon_r$ ， y^* 为观察位置， ϵ_r 为观察噪声。

对辨识函数进行泰勒展开，有下式

$$J_n = J_n + \frac{\partial J}{\partial a} a + \frac{\partial J}{\partial b} b + \frac{\partial J}{\partial c} c + o(a^2, b^2, c^2)$$

J 取最小值的必要条件为

$$\frac{\partial J_{n+1}}{\partial a} = 0; \frac{\partial J_{n+1}}{\partial b} = 0; \frac{\partial J_{n+1}}{\partial c} = 0 \quad (6)$$

利用(6)可建立确定 a, b, c 的三个代数方程式，即

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 J}{\partial a^2} a + \frac{\partial^2 J}{\partial a \partial b} b + \frac{\partial^2 J}{\partial b \partial c} c &= -\frac{\partial J}{\partial a} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial a \partial b} a + \frac{\partial^2 J}{\partial b^2} b + \frac{\partial^2 J}{\partial b \partial c} c &= -\frac{\partial J}{\partial b} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial a \partial c} a + \frac{\partial^2 J}{\partial b \partial c} b + \frac{\partial^2 J}{\partial c^2} c &= -\frac{\partial J}{\partial c} \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式中系数可分别对(4)求导得到。利用公(7)式，可确定 a, b, c ，这样整个辨识过程可括为：

- (1)给定预估值 a_0, b_0, c_0 ;
- (2)用数值解法求灵敏度方程(4)得到 $u_1(y, t), u_2(y, t), u_3(y, t)$;
- (3)由(5)式，计算辨识准则函数 J 及其一阶和二阶导数，并由(7)式计算 a, b, c ;
- (4)判断是否收敛，若收敛，则 $a = a_0 + \Delta a, b = b_0 + \Delta b, c = c_0 + \Delta c$ ，若不收敛，则以 a, b, c 返回(2)式重复迭代。

4 涂层材料热导率参数辨识结果及分析

对涂层材料进行电弧加热器地面加热模拟试验，根据试验状态及材料的热物性参数，并利用试验的背面温度测量结果，对热导率进行参数辨识计算，主要是对碳化层的热导率进行辨识。在计算的过程中原始材料的热导率采用的是常温的测试结果。表1给出了试验试件的辨识结果。

表1的结果表明，同一种材料不同试件的辨识结果是接近的，表明结果是可信的。

表1 试验试件的辨识结果

Tab 1 Parameter identification results of test samples				
模型编号	材料编号	$A/10^{-5}$	$B/10^{-9}$	$C/10^{-15}$
T ₁	190	2.601	15.55	10.6
T ₃	192	2.599	-8.83	9.39
T ₉	194	2.599	-9.23	7.14
L ₅	193	2.596	-4.11	6.98
L ₉	190H	2.596	-4.35	6.40
L ₁₄	192	2.596	-3.82	5.97

5 背面温度计算结果与分析

利用表1的辨识结果，对六个试件的背面温度进行了计算，图1~图6给出其计算结果。T₁、T₃、T₉试验试件底材为钛板，试验背面温度比较高，从图形上可以看到参数辨识后背温符合得比较好，而L₅、L₉、L₁₄试验试件底材为铝板，试验背面温度较低，背面温

度计算结果符合得相对较差。说明在热传导过程中表面温度与背面温度相差得越小,背面温度所传递的热传导过程的信息就越多,参数辨识工作的效果越好。

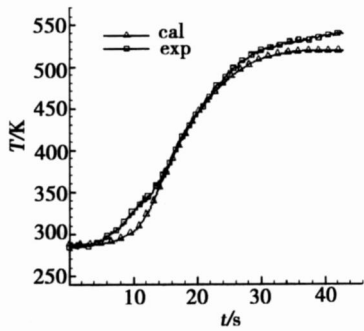


图 1 T_1 试件试验和计算背温比较

Fig 1 Temperature comparison of T_1 sample

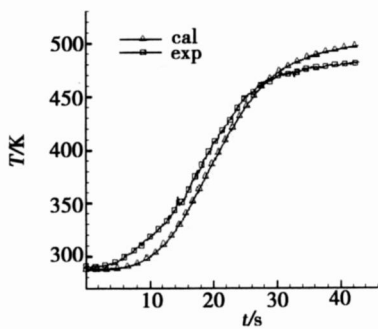


图 2 T_5 试件试验和计算背温比较

Fig 2 Temperature comparison of T_5 sample

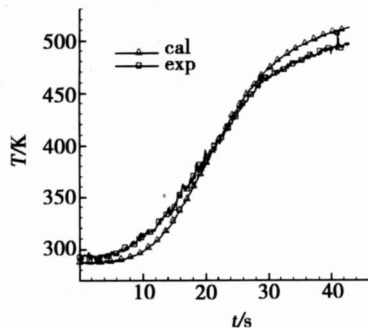


图 3 T_9 试件试验和计算背温比较

Fig 3 Temperature comparison of T_9 sample

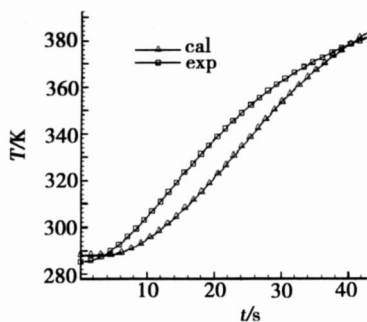


图 4 L_5 试件试验和计算背温比较

Fig 4 Temperature comparison of L_5 sample

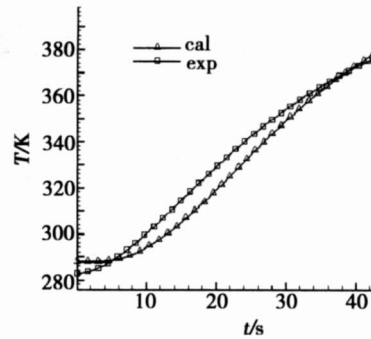


图 5 L_9 试件试验和计算背温比较

Fig 5 Temperature comparison of L_9 sample

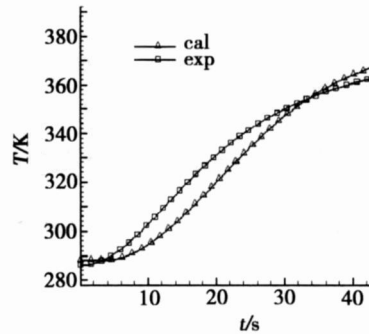


图 6 L_{14} 试件试验和计算背温比较

Fig 6 Temperature comparison of L_{14} sample

6 结论

利用灵敏度方法对涂层材料的热导率进行了参数辨识,经过对多个试验试件及试验状态的计算,可以得到以下的结果:

- (1)利用参数辨识的灵敏度方法可以确定有热解反应的材料热导率;
- (2)由参数辨识法确定的热导率,用于隔热涂层的温度场计算,背面升温与测量结果符合较好。

参考文献

- 1 黄志澄等主编. 航天空气动力学. 北京:宇航出版社, 1994: 365 ~ 408
- 2 姜贵庆,刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护. 北京:国防工业出版社,2003: 52 ~ 90
- 3 姜贵庆,马淑雅. TYC - 1 涂层材料热防护性能预测. 宇航材料工艺, 2002; 32 (1): 42 ~ 45
- 4 姜贵庆,马淑雅. 隔热涂层材料热防护性能预测. 空气动力学学报, 2004; 22 (1): 24 ~ 28
- 5 任斌,蔡金狮. 用灵敏度法对分布参数的参数辨识. 空气动力学学报, 1994; 12 (4): 455 ~ 459

(编辑 任涛)