

参数估计对激光脉冲法热损失修正的计算及验证

杨 阳 何小瓦 辛春锁

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 描述了参数估计在激光脉冲法测量热扩散率中应用的基本原理,研究了试验过程中热损失对试样背面温升的影响,计算了热扩散率、热损失系数和能量系数的敏感性系数,依据单纯形搜索法原理,采用 MATLAB 软件对试验数据进行了参数估计运算,并验证其可行性。

关键词 参数估计,激光脉冲法,敏感性系数, MATLAB 软件

Calculation and Verification for Effects of Heat Loss of Flash Method Based on Parameter Estimation

Yang Yang He Xiaowa Xin Chunsuo

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Theory of parameter estimation for flash method of determining thermal properties is described, and simplified on the basis of sensitivity coefficients and physical significance of the parameters in the paper. By MATLAB software, the effect of heat loss on rear temperature rise is investigated, simplex search is carried out to estimate parameters with testing data, and the thermal diffusivity is obtained.

Key words Parameter estimation, Flash method, Sensitivity coefficients, MATLAB software

0 引言

材料热物理性能测试的诸多手段中,激光脉冲法由于具有试样尺寸小、测试周期短、温度范围广和测量区间宽等优点而被广泛采用,其测试的物理模型是建立在试样正面到背面的一维热流和试样无热损或热损失应减小到可忽略不计的假设前提下^[1]。但是在高温条件下,热损失严重,不可忽略,根据试样背面温度达到最大值的一半时所需的时间计算热扩散率会产生很大的误差。针对这一问题,很多学者采用参数估计^[2]方法,其提供了一种有效利用数据去估计数学模型中相关参数的方法。近年来计算机技术发展迅速,更有利于参数估计方法的广泛应用。本文通过试验获得的背温曲线数据,根据激光脉冲法测试中试样背温曲线的数学模型,应用 MATLAB 软件研究热损失对背温曲线的影响,计算各待估参数的敏感性系数,并估计材料的热物理性能参数。

1 原理

1.1 激光脉冲法原理及数学模型

激光脉冲法的测试原理是,当一个匀质圆片状的薄试样,在绝热条件下,前表面受瞬时脉冲热流加热,

根据试样背表面温度随时间的变化情况,确定试样的热扩散率。这种方法在推导过程中作了如下假设:

(1) 试样材质均匀,各向同性,在试样受到脉冲热流加热而产生的温升范围内,材料的物理性能可作常数处理;

(2) 试样的一面均匀受辐照,并在其表面极薄层(厚度为 g)内被吸收;

(3) 试样内只存在一维热流,无侧向热损;

(4) 激光脉冲宽度无限短。

采用厚度为 L 的平板试样,假设初始时刻,激光脉冲对 $x=0$ 的试样表面加热,环境温度 T_{∞} 恒定。其数学模型为:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T 为温度, x 为坐标, t 为时间, α 为材料的热扩散率。综合辐射和对流传热热损,定义热损换热系数为辐射换热系数和对流换热系数之和, h_1 、 h_2 分别为试样前后表面的换热系数,那么试样前后表面的边界方程可以写为:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q_0 \delta(t) - h_1 [T(0, t) - T_{\infty}] \quad (2)$$

收稿日期: 2011-03-05

作者简介:杨阳,1983 年出生,硕士,主要从事材料物理性能测试方面的研究。E-mail: yangyang_722@163.com

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h_2 [T(L,t) - T_\infty] \quad (3)$$

$\delta(t)$ 为狄拉克函数,输入的单位能量为 q_0 , T_∞ 为初始温度, λ 为试样热导率,并假设温升过程中不随温度升高发生明显变化。上式的解析解为格林函数:

$$T(L,t) = T_\infty + \frac{2q_0}{\rho c L} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \frac{C_n}{N_n} \quad (4)$$

$$C_n = \eta_n (\eta_n \cos \eta_n + B_1 \sin \eta_n) \quad (5)$$

$$N_n = (\eta_n^2 + B_1^2) \left(1 + \frac{B_2}{\eta_n^2 + B_2^2} \right) + B_1 \quad (6)$$

式中, η_n 是方程的 $\tan \eta_n = \eta_n (B_1 + B_2) / (\eta_n^2 - B_1 B_2)$ 的特征根, $\lambda_n = \eta_n / L$, $B_1 = h_1 L / \lambda$ 是 $x=0$ 处的换热系数,

$B_2 = h_2 L / \lambda$ 是 $x=L$ 处的换热系数。令 $\beta_1 = \alpha$, $\beta_2 = \frac{q_0}{\rho c L}$,

$\beta_3 = B_1$, $\beta_4 = B_2$, 这样背温曲线方程可表示为只含有四个未知参数的方程。

$$T(L,t) = f(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, t) = T_\infty + 2\beta_2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta_1 \lambda_n^2 t} \frac{C_n}{N_n} \quad (7)$$

式中, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 分别是待估计的热扩散率, 能量系数及两个热损系数。

1.2 热损失对背温曲线的影响

当模型中的参数已知时, 可根据方程(7), 通过 MATLAB 软件计算激光脉冲法测试试样热扩散率的背温曲线。热损失对背温曲线的影响如图 1 所示。

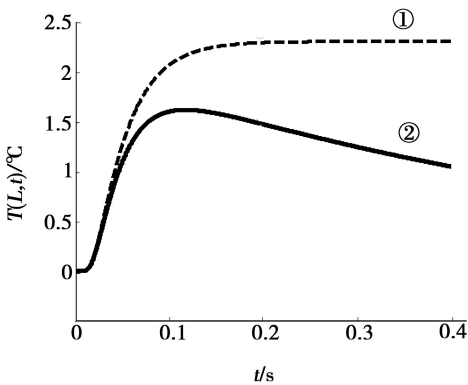


图 1 热损失对试样背温曲线的影响

Fig. 1 Effect of heat loss on the curve of temperature rise

①—为无热损的理想情况, ②—为存在热损且不可忽略的背温曲线。

图 1 可见, 由于热损失的影响, 曲线②低于曲线①, 并呈马鞍形, 其顶部对应于试样背面热损失与因热扩散而获得的热量相等的瞬间, 此后, 由于获得的热量不足以弥补损失的热量, 曲线下降。存在热损失时, 所得的热扩散率数值偏大。因而在实际测试中, 必须考虑到热损失的影响。这就使得利用激光脉冲法测试材料热扩散率时, 测试结果必须进行热损失分析修正, 目前有效的分析方法之一就是参数估计

法^[3]。

2 参数估计

2.1 参数敏感性系数的计算

一般而言, 在进行参数估计之前, 都要对数学模型中的未知参数进行敏感性系数计算, 并分析未知参数相互之间的相关性。敏感性系数是实验过程中的变量对待估参数的偏导数。对于多参数估计的情形, 参数之间的线性相关性在参数估计计算中起重要的作用。考察线性相关性的一种方法就是考察各个参数的敏感性系数趋势图, 如果它们表现出接近线性相关, 则相应的参数是关联的并且不能同时进行预测。另外还要关注敏感性系数的幅值, 敏感性系数越大, 该参数越容易被识别, 进行参数估计时, 获得准确值的可能性更大一些。

本文采用 MATLAB, 依据公式 $s_i = \frac{\beta_i}{\beta_2} \frac{\partial T}{\partial \beta_i}$ 计算各参数的灵敏度系数^[4], β_i 是对灵敏度系数的无因次修正, β_2 是要消除能量系数对 s_i 的影响。以 $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 1$, $\beta_3 = 0.5$, $\beta_4 = 0.1$ 为例, 计算结果如图 2 所示。

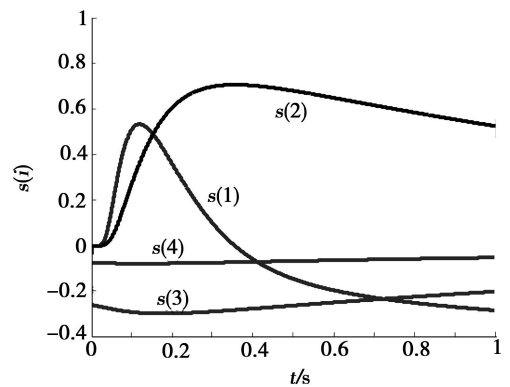


图 2 各参数的敏感性系数趋势图

Fig. 2 Sensitivity coefficients for the parameters

可见, 初始阶段 β_1 敏感性系数数值较大, 达到某最大值后, 开始下降, 直至负值。 β_2 敏感性系数相对变化缓慢, 达到某最大值后缓慢下降。 β_3, β_4 的敏感性系数幅值比较小, 参数估计时获得准确值的可能性不大, 并且形状相似, 两参数之间存在较大的相关性。并且真空条件下, 只有热辐射造成试样的热损失, 而辐射热损只与试样辐射特性和初始温度有关^[5], 故可以简化认为 $\beta_3 = \beta_4$ 。因此, 对式(4)~式(7)整理, 可得只含有三个未知参数的方程:

$$T(L,t) = T_\infty + \sum_{n=1}^{\infty} a_n e^{-\beta_1 \lambda_n^2 t} \left(\cos \lambda_n L + \frac{\beta_3}{\lambda_n} \sin \lambda_n L \right) \quad (8)$$

式中, $a_n = \frac{2\lambda_n^2}{(\lambda_n^2 + \beta_3^2)L + 2\beta_3} \beta_2 \beta_1$ 。

2.2 参数估计

参数估计是反问题的研究, 由一定的单值性条件下的解来确定偏微分方程中的系数, 在导热方程中, 这些系数即热物理性能参数。

2.2.1 目标函数

选取目标函数为方差和。

$$R = \sum_{i=1}^N [y(t_i) - f(\beta_1, \beta_2, \beta_3, t_i)]^2 \quad (9)$$

式中, $y(t_i)$ 是 t_i 时刻试样背面温升的测量值, $i=1, 2, \dots, N$, N 是测量数据的个数。 $f(\beta_1, \beta_2, \beta_3, t_i)$ 是给定一组 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 数值条件下算得的不同时刻的背面温升计算值。

2.2.2 求取目标函数极小

应用 MATLAB 软件, 编制程序, 通过 fminsearch 命令实现单纯形搜索法^[6]使目标函数达到最小。

单纯形搜索法是对单纯形的 $n+1$ 个顶点的函数值进行比较, 丢掉其中的函数值最大的点, 代之以函数值较小的点, 从而构成一个新的单纯形, 使单纯形逐步逼近函数的极小点的一种搜索方法。给出 $n+1$ 个点 $x^{(i)} (i=1, 2, 3, \dots, n+1)$, 设 i_h 和 i_l 分别是对应函数值最大和最小的指标:

$$f(x^{i_h}) = \max_{1 \leq i \leq n+1} f(x^{(i)}) \quad (10)$$

$$f(x^{i_l}) = \min_{1 \leq i \leq n+1} f(x^{(i)}) \quad (11)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq i_h}^{n+1} x^{(i)} \quad (12)$$

使用反射、扩展、压缩、收缩四种手段替换函数值最差的点, 直到满足终止判别条件:

$$\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq i_h}^{n+1} (f(x^{(i)}) - f(x^{i_l}))^2 \right]^{1/2} \leq \varepsilon \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} \|x^{(i)} - \bar{x}\|_2^2 \leq \varepsilon \quad (14)$$

式中, ε 是事先给定的精度。

2.3 验证

采用激光脉冲法对标准材料奥氏体不锈钢 SRM1461 试样进行热扩散率测试, 试样为 2.5 mm, 测试环境为室温至 800℃。以较低温度下的 300℃ 和高温的 800℃ 获得的曲线为例, 进行比较, 结果如图 3 所示。可见, 与 300℃ 时获得的试验曲线相比, 800℃ 时曲线下降部分的斜率较大, 试样热损失严重。

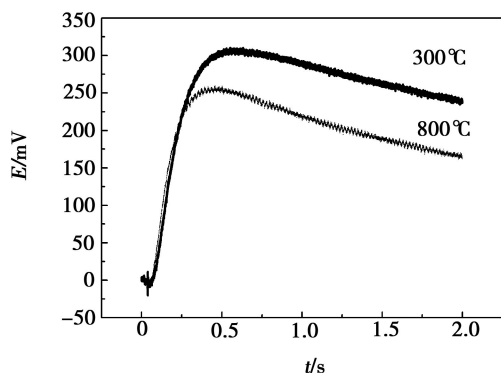


图3 试验获得不同温度下试样背面温升时间曲线

Fig.3 Curves of temperature rise at different temperatures

通过所编制的 MATLAB 程序, 对测试获得的数据进行参数估计, 得到的热扩散率如表 1 所示。

由表可见, 参数估计得到的材料热扩散率与标准数据非常接近, 但均小于标准数据, 这是由于参数估计结果虽然对测试结果进行了热损失修正, 并未进行脉宽修正^[7]。100℃ 时误差较大, 其主要原因是设备受外界干扰信号影响, 获得的数据存在一定的偏差。

表 1 参数估计结果与标准数据的比较

Tab.1 Comparisons between standard data and results of parameter estimation

环境温度 /℃	标准数据 ¹⁾ /mm ² ·s ⁻¹	参数估计结果 /mm ² ·s ⁻¹	误差 /%
100	4.13	3.82	-7.51
200	4.29	4.11	-4.20
300	4.51	4.28	-5.32
400	4.73	4.64	-1.90
500	4.94	4.70	-4.86
600	4.99	4.91	-1.60
700	5.21	5.11	-1.92
800	5.37	5.28	-1.68

注: 1) “标准数据”为耐驰公司提供的标样数据。

3 结论

(1) 激光脉冲法测试试样热物理性能, 高温条件下, 试样热损失严重, 背温曲线升至某一值时获得的热量不足以弥补损失的热量, 曲线开始下降;

(2) 根据试样背温升温曲线数学模型, 利用 MATLAB 计算各待估参数的敏感性系数, 其变化趋势表明试样前后表面的热损失系数可简化认为相同, 进行参数估计时, 可采用同一值进行计算, 对热扩散率的估计结果不会产生明显的影响;

(3) 编制 MATLAB 程序, 通过对测试获得的有限个数据点进行参数估计, 计算材料的热扩散率, 并与试验结果、标准数据进行比较, 在未进行脉宽修正及干扰信号剔除等工作的情况下, 估计结果能够很好的接近标准数据。

参考文献

- [1] Parker W J, Jenkins R J, Butler C J. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity[J]. J. Applied Phys., 1961, 32(9):1679-1684
- [2] 薛健. 激光在理化检测中的应用(上册)[M]. 长沙: 中南工业大学粉冶所, 1986
- [3] 顾毓沁. 参数估计在测量热物性中的应用[J]. 工程热物理学报, 1987, 8(1): 83-86
- [4] Beck J V, Dinwiddie R. Parameter estimation method for flash thermal diffusivity with two different heat transfer coefficients[C]//Oak Ridge National Lab., TN. CONF-9519111-4, 1995:14
- [5] Taylor R E, Clark III L M. Radiation loss in the flash method for thermal diffusivity[J]. J. Applied Phys., 1975, 46(2): 714-719
- [6] 袁亚湘. 非线性优化计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [7] Cape J A, Lehman G W. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity[J]. J. Applied Phys., 1963, 34(7):1909-1913

(编辑 任涛)