

瞬态平面热源法测量材料导热系数

肖红俊[✉] 于帆 张欣欣

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: xhj543240343@163.com

摘要 为了提高瞬态平面热源法的适用温度,介绍了瞬态平面热源法的测量原理. 根据有限元法模拟了无膜平面热源加热过程中试样的温度分布,建立了相应的实验装置,测量了环境温度为 27 ~ 829 °C 时材料的导热系数和热扩散率. 结果表明在较高温度下该方法测量材料热导率是有效的,可用于实际测量.

关键词 热传递; 导热系数; 热扩散率; 测量; 数值分析

分类号 TK123

Thermal conductivity measurement of materials based on a transient hot-plane method

XIAO Hong-jun[✉], YU Fan, ZHANG Xin-xin

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: xhj543240343@163.com

ABSTRACT The measurement principle of a transient hot-plane method was introduced to improve the service temperature of the method. The sample temperature distribution of a filmless plane heat source during heating process was simulated based on the finite element method. The experimental apparatus was established and practical measurements for the thermal conductivity and thermal diffusivity of materials were made at an environment temperature of 27 to 829 °C. The results show that the transient hot-plane method is effective for measuring the thermal conductivity of materials in a high temperature environment, which is applicable to actual measurements.

KEY WORDS heat transfer; thermal conductivity; thermal diffusivity; measurements; numerical analysis

导热系数和热扩散率是表征材料热传递性能的热物性参数. 较高温度环境下,准确获得材料的热物性参数对各种材料的应用尤为重要. 目前,导热系数主要依靠实验测量得到,相关的测量方法有很多种,各种方法的测量条件、测量的参数个数、精度和准确度、试样尺寸及其范围都各不相同^[1],而材料的使用往往涉及多个热物性参数,因此要求测量设备尽可能同时准确地测量出多个热物性参数. 例如,保护热板法仅仅能测出试样的导热系数,而不能测量热扩散率^[2];常功率热源法通常需要测量多点温度^[3],影响测量精度. 本文在不同温度下,使用阶跃式瞬态平面热源法仅需测量试样上一个点的温度

即可同时测得材料的导热系数和热扩散率. 瞬态平面热源法(包括阶跃式瞬态平面热源法和脉冲式瞬态平面热源法)是由斯洛伐克科学家 Kubicar 提出的^[4-5].

在阶跃式瞬态平面热源法理想数学模型的推导过程中,忽略了热源热容,且认为热源以恒定热流密度均匀加热试样,这与实际模型并不完全相同. 实际测量中平面热源(加热片)本身具有热容,其形状为连续的 U 形结构,相互间存在间隙,两侧都覆盖聚酰亚胺膜用于固定和保护热源,所以热源并非定热流均匀加热. 进一步分析,由于聚酰亚胺膜使用温度较低、阻碍热量传递,将会引起测量结果出现一

收稿日期: 2011-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776009)

定偏差;同时 较高温度下也无法使用这样的热源进行实验测量. 本文将对平面热源法无膜热源模型进行探讨 将无膜加热片视作物理模型的内热源,对试样温度分布进行数值模拟,并与理想模型温度场进行比较,确定试样任意截面内热电偶的放置区域;然后,建立相应的实验装置,对标准绝热材料和普通耐火砖的导热系数进行测量;实验结果表明平面热源可以在较高温度下用于材料导热系数和热扩散率的测量.

1 平面热源法的测量原理^[6]

瞬态平面热源法可以快速测量试样的导热系数和热扩散率,其原理是向电热合金制成的金属片通过某种固定形式(阶跃式或脉冲式)的电流,金属片释放热量而成为热源,即平面热源.本文中的电流形式为阶跃式.使用该热源加热试样,并测量出试样某点(实验中通常取试样某截面的中心点,该点相当于中心探测区^[7]) 过余温度-时间曲线.根据相应的数学模型和改进高斯-牛顿参数估计法可以同时测得试样的导热系数 λ 和热扩散率 a ,进一步得到体积热容 $\rho c = \lambda/a$,式中 ρ 表示试样的密度, c 表示试样的比热容.物理模型如图 1 所示.

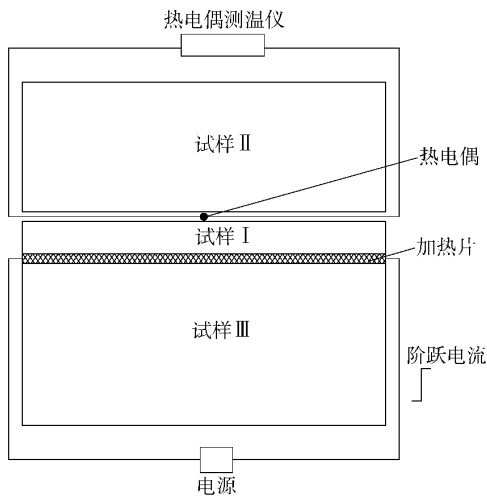


图 1 物理模型
Fig. 1 Physical model

对于固体导热而言,实际的热传导过程都是复杂的三维过程.为了简化分析,假设模型与周围环境之间不存在换热,热量只沿某个固定的方向进行传导,例如厚度方向,这样的模型即是理想一维模型.实际测量中,只要满足半无限大理论模型即可将它认为是理想一维模型,平面热源法正是基于该理论来测量材料的导热系数,如图 2 所示,得到相应的导热微分方程、初始条件和边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(z,t)}{\partial t}, & (t > 0, 0 \leq z < +\infty); \\ T(z,0) = 0, & (t = 0, z \geq 0); \\ -\lambda \left. \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = q(t), & (t > 0, z = 0); \\ T(z,t) \rightarrow 0, & (t > 0, z \rightarrow +\infty). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T(z,t)$ 为过余温度,试样真实温度与系统初始温度 T_0 之差, $^{\circ}\text{C}$; z 为热传导方向的空间坐标, m ; t 为时间, s ; λ 为试样导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; a 为试样热扩散率, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $q(t)$ 为试样加热面上的热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.若电流以阶跃形式出现,当加热电流为 I ,加热片两端的电压为 U ,平面热源电阻为 R , $q(t) = Q/(2S) = UI/(2S) = I^2 R/(2S)$, Q 为加热功率, W ; S 为平面热源的面积, m^2 .

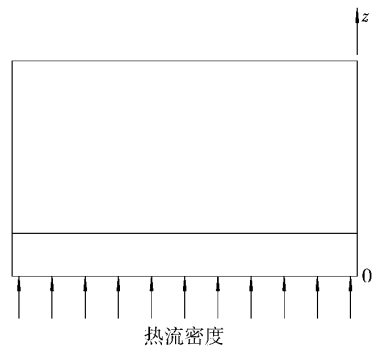


图 2 瞬态导热理想模型
Fig. 2 Ideal model of transient heat conduction

对式 (1) 中的时间变量 t 作完全的拉普拉斯变换(即对偏微分方程和边界条件都作拉氏变换)^[8],以求解 $0 \leq z \leq +\infty$ 区间内各截面中心点过余温度随时间的变化关系 $T-t$ 曲线,设象函数为 $\theta(z,p)$,变换后得到:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \theta(z,p)}{dz^2} = \frac{p}{a} \theta(z,p), & (t > 0, 0 \leq z < +\infty); \\ \theta(z, \infty) = 0, & (t = 0, z \geq 0); \\ -\lambda \left. \frac{\partial \theta(z,p)}{\partial z} \right|_{z=0} = \phi(p), & (t > 0, z = 0); \\ \theta(z,p) = 0, & (t > 0, z \rightarrow +\infty). \end{cases} \quad (2)$$

式中 p 为拉普拉斯变量, θ 为温度 $T(z,t)$ 的拉普拉斯变换, $\phi(p)$ 为热流 $q(t)$ 的拉普拉斯变换,其中

$$\theta(z,p) = L[T(z,t)] = \int_0^{\infty} T(x,t) e^{-pt} dt, \quad (3)$$

$$\phi(p) = L[q(t)] = \int_0^{\infty} q(t) e^{-pt} dt. \quad (4)$$

求解式 (2) 得到

$$\theta(z, p) = \frac{\sqrt{a}}{\lambda} \frac{\phi(p)}{\sqrt{p}} \exp\left(-\sqrt{\frac{p}{a}}z\right). \quad (5)$$

本文以阶跃式电流通过金属片,加热时间内, $q(t)$ 为常数,利用拉氏反变换对式(5)进行求解,得到相应的数学模型:

$$T(z, t) = q(t) \frac{\sqrt{a}}{\lambda} \left[2 \sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - \frac{z}{\sqrt{a}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right]. \quad (6)$$

式中 erfc 为余误差函数.

在式(6)中,被测试样厚度 $z = z_0$ 处的平面中心点处过余温度 $T(z_0, t)$ 随时间 t 的变化是实验中可以使用多通道数字示波器直接测量得到的,因此式中仅含导热系数 λ 和热扩散率 a 两个未知参数. 又由于 λ 和 a 是线性无关^[6]的,根据式(6)可以利用改进高斯-牛顿参数估计法^[9-10]编写程序同时计算出 λ 和 a 这两个参数,进一步可以得到体积热容 $\rho c = \lambda/a$.

加热过程中,金属片两端的电压 U 和电流 I 也都可以使用多通道数字示波器测量得到,金属片的有效加热面积 S 可以直接测量得到,因此 $q(t) = UI/(2S)$,为常数.

2 数值模拟

三维模型中,将无膜加热片作为内热源,试样与周围环境之间存在热交换,其温度场与理想模型并不相同,因而模拟了试样温度分布,比较了理想模型与三维模型同一截面厚度上的温度分布.

三维模型如图3所示.几何尺寸: $L = 89.94 \text{ mm}$ $l = 2.37 \text{ mm}$ $j = 0.50 \text{ mm}$ $z_1 = 12 \text{ mm}$ $z_2 = 0.05 \text{ mm}$ $z_3 = 40 \text{ mm}$ $z_1 \ll z_3$.

物性参数:热源材料 $0\text{Cr}21\text{Al}6\text{Nb}$ ^[11]的导热系数为 $12.81 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,体积热容为 $3.5074 \times 10^7 \text{ J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}$;耐火砖的导热系数为 $1.0291 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,体积热容为 $1.8548 \times 10^6 \text{ J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}$;初始环境温度 $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$,对应的综合换热系数 $h = 12 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})^{-1}$;对普通耐火砖的加热功率为 15.47 W ,换算为内热源 $g = 2.4091 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$,加热功率的选取应使得试样截面中心温升为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右;加热时间 $t = 450 \text{ s}$.理想模型:试样与周围环境绝热,忽略热源热容,以恒定热流密度加热试样,加热功率大小与三维模型相等,换算后 $q = 956.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,其余条件均与三维模型一样.

引入无量纲的量 $X = x_0/L$, x_0 表示 x 方向上三维模型与理想模型试样同一空间点温差 $\leq 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 时点

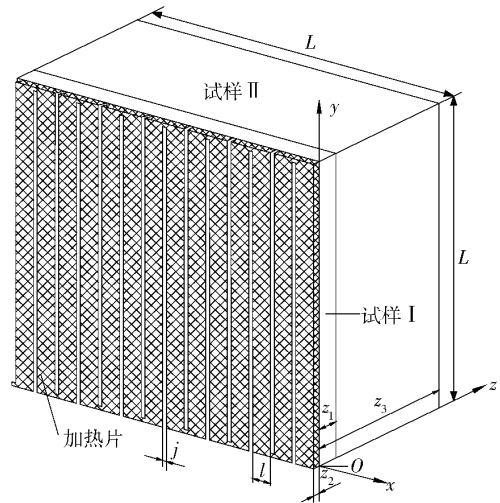


图 3 三维模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the three-dimensional model

到其所在截面中心的最大距离,三维模型试样任意截面上越靠近中心的点其温度分布越接近理想模型中同一点的温度分布,如图4所示;三维模型与理想模型中试样同一中心点 $T-t$ 曲线具有很好的重合性,如图5所示.模拟结果表明,实际测量中测温点应尽量选取在试样截面中心,该点的 $T-t$ 曲线与理想模型 $T-t$ 曲线重合性最好,所得的测量结果也更准确.

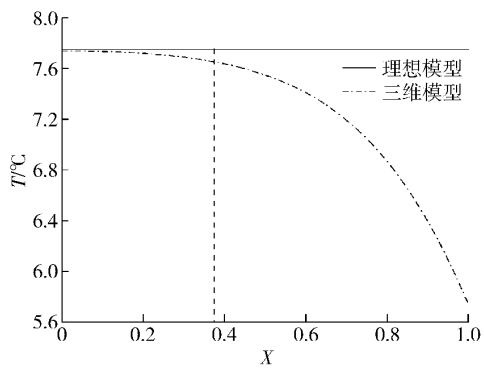


图 4 $z = 12 \text{ mm}$ 截面 x 轴正方向上过余温度分布

Fig. 4 Surplus temperature distribution of the sample along the positive x -axis direction at the $z = 12 \text{ mm}$ section

3 实验研究

3.1 实验装置

根据平面热流法的基本原理建立了相应的实验测量装置,如图6所示.炉内:待测试样由三块同种均质材料 I、II 和 III (普通耐火砖) 构成,且三块试样的截面尺寸完全一样,厚度分别为 $z_1 = 12 \text{ mm}$, z_2, z_3 , 其中 $z_2, z_3 \gg z_1$,与试样接触完好的无膜加热片尺寸 $L \times L = 89.94 \text{ mm} \times 89.94 \text{ mm}$,厚度为

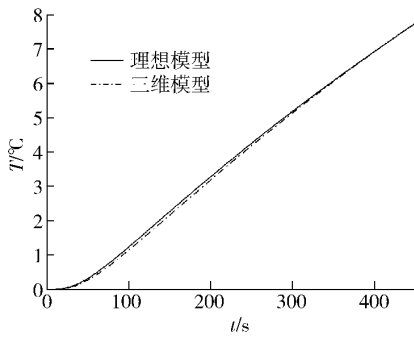


图 5 $z = 12 \text{ mm}$ 截面中心过余温度与时间的关系

Fig. 5 Relationship between time and surplus temperature of the sample center at the $z = 12 \text{ mm}$ section

0.1 mm 加热片放置在试样 I 和试样 III 之间; 在试样 I 和试样 II 之间放置 $\phi 0.1 \text{ mm}$ 的 K 型热电偶, 热电偶位于截面中心, 然后将试样放入加热炉中. 炉外: 将热电偶接到八通道数字示波器 DL708E, 该示波器配有热电偶测温冷端补偿装置, 设置示波器每秒采集两个数据点; 使用数字示波器 DL708E 分别记录热电偶所测温度、加热片两端电压 U_1 以及标准电阻 R_a 两端的电压 U_2 , 标准电阻 $R_a = 1 \Omega$, $I = U_2 / R_a$, 所以在数值上 $I = U_2$; 恒流电源 DH1719 A-2, 提供 0 ~ 5 A 的电流 $\rho \sim 24 \text{ V}$ 的电压.

实验过程中, 紧闭箱式炉炉门, 先打开示波器, 测量开始, 观测示波器上热电偶所测温度 (环境温度) 是否恒定, 待环境温度恒定后, 接通直流电源加热试样, 示波器实时记录温度 (试样截面中心温

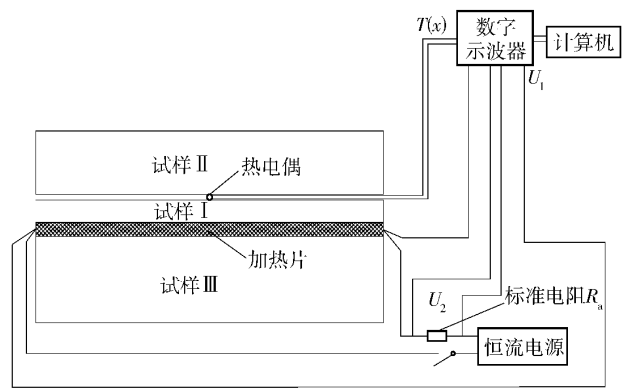


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental apparatus

度)、电压 U_1 和 U_2 ; 当测量结束时, 先保存示波器测量结果, 再断开直流电源, 最后关闭示波器; 利用改进的高斯-牛顿参数估计法对测量结果求解后可得到 λ 和 a .

3.2 实验结果

本文利用阶跃式瞬态平面热源法分别对标准绝热材料和普通耐火砖的相关热物性参数进行多次测量, 测量得到相应的热物性参数平均值见表 1 和表 2. 表 2 中最大相对偏差表示单次测量值相对于多次测量所得平均值间的最大偏差. 图 7 为普通耐火砖内部点 $T-t$ 曲线的测量值 (点表示) 与理论拟合曲线 (实线表示) 的比较. 图 8 为测量得到的普通耐火砖热物性参数随过余温度的变化情况.

表 1 标准绝热材料的导热系数测量结果

Table 1 Measurement results of thermal conductivity for the standard insulation material

炉温/ $^{\circ}\text{C}$	测量方法	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$a / (10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho c / (10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$
30	平面热源法 (阶跃式)	0.033387	1.7639	1.8928
	热带法	0.033200	—	—
	标准数据	0.033745	—	—
102	平面热源法 (阶跃式)	0.042103	2.2576	1.8649
	标准数据	0.042053	—	—

表 2 普通耐火砖热物性参数测试结果

Table 2 Measurement results of thermal property parameters for general refractory bricks

测量方法	炉温/ $^{\circ}\text{C}$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$a / (10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho c / (10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	λ 最大相对偏差/%	a 最大相对偏差/%
热带法	27	1.0048	—	—	2.66	—
	27	1.0291	5.5484	1.8548	1.50	0.75
平面热源法 (阶跃式)	260	1.3068	5.7363	2.2781	2.07	2.35
	511	1.5340	5.8869	2.6058	2.21	2.43
	829	1.6448	5.9585	2.7604	3.23	3.78

实验误差主要来自于实验条件与理论模型的偏差, 以及方程 (6) 中各参数的测量误差, 包括电压 U 和电流 I 、温度 T 、时间 t 和测温点距离 z 的测量误差. 一般, $|\Delta U/U| \leq 1.5\%$, $|\Delta I/I| \leq 1.5\%$, $|\Delta T/$

$T| \leq 1\%$, $|\Delta t/t| \leq 0.1\%$, z 的测量误差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 若 $z_1 = 12 \text{ mm}$ 则 $|\Delta z/z| \leq 0.083\%$, 故近似有 $|\Delta \lambda/\lambda| < 4.2\%$, $|\Delta a/a| \leq 4.2\%$.

从表 1 中可以看出, 平面热源法测量材料的导

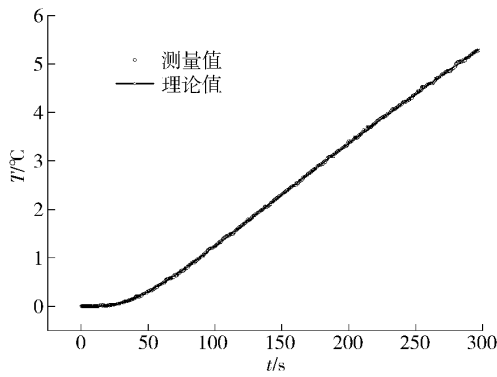


图 7 过剩温度响应曲线

Fig. 7 Response curve of surplus temperature

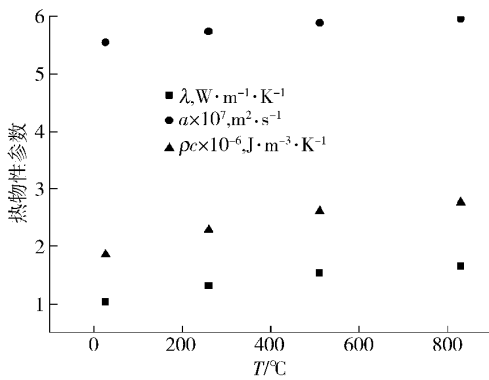


图 8 热物性参数随过剩温度的变化

Fig. 8 Relationship between thermal property parameters and surplus temperature

热系数具有较高的准确率. 从表 2 中可以看出, 对于热物性参数未知的普通耐火砖, 该测量系统具有较好的重复性, 导热系数 λ 和热扩散率 a 的最大相对偏差不超过 5%.

此外, 针对具体的被测试样, 应该选择合适的加热功率和加热时间, 还应该注意加热试样之前一定要保证初始环境是恒定的, 相邻两次测量应该间隔足够长的时间以保证试样温度冷却至加热之前的环境温度.

4 结论

(1) 三维模型试样任意截面上越靠近中心的点其温度分布越接近理想模型, 三维模型与理想模型中试样同一中心点 $T-t$ 曲线具有很好的重合性.

(2) 对标准绝热材料和普通耐火砖的导热系数测试结果表明, 该测量系统具有较好的复现性与准确性. 较高环境温度下, 可用无膜平面热源模型对材料热物性参数进行测量. 但是, 该模型不适于测量导热良好材料的热物性参数.

(3) 将瞬态平面热源法测量系统的环境温度提高到 829 °C, 验证了较高温度下该方法测量材料导

热系数和热扩散率的可行性. 对于更高环境温度下材料的 λ 和 a 的测量还有待进一步的研究.

参 考 文 献

[1] Wang J L, Cai H W, Jiang Z Y. Thermophysical property measurement of thermal insulation coatings by pulse hot-plane method. *Control Instrum Chem Ind*, 2009, 36(2): 43
(王瑾璐, 蔡会武, 江照洋. 基于脉冲平面热源法测定保温涂料导热系数. 化工自动化及仪表, 2009, 36(2): 43)

[2] Zuo L, Zhu S K. The application of step-wise transient method on non-woven fabric's thermal properties. *J Donghua Univ Nat Sci*, 2010, 36(1): 41
(左磊, 朱苏康. 阶跃式平面热源法在测量非织造布热物性参数上的应用. 东华大学学报: 自然科学版, 2010, 36(1): 41)

[3] Zhou J M, Zhu Z X, Xie D J, et al. Thermal physical property of refractory material measured by plane heat source method with constant heat rate. *J Central South Univ Sci Technol*, 2011, 42(5): 1467
(周子民, 朱再兴, 谢东江, 等. 常功率平面热源法测试耐火材料热物性的研究. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(5): 1467)

[4] Kubicar L. *Thermal Analysis: Part E. Pulse Method of Measuring Basic Thermophysical Parameters*. New York: Elsevier Science, 1990

[5] Kubicar L, Bohac V. Review of several dynamic methods of measuring thermophysical parameters // *Proceedings of 24th International Conference on Thermal Conductivity*. Lancaster: Technomic Publishing Company, 1999: 135

[6] Yu F, Zhang X X, He X W. Measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity for materials hot-plane method. *J Astronaut Metrol Meas*, 2006, 26(6): 13
(于帆, 张欣欣, 何小瓦. 非稳态平面热源法同时测量材料的导热系数和热扩散率. 宇航计测技术, 2006, 26(6): 13)

[7] Wang Q, Dai J M, Coppa P. Thermophysical property measurement of thermal protective material by guarded plane source method. *J Tianjin Univ*, 2010, 43(12): 1086
(王强, 戴景民, Coppa P. 基于保护平面热源法的防隔热材料热物性测量. 天津大学学报, 2010, 43(12): 1086)

[8] Chen Z D. Investigation of transient measurement thermal properties by plain thermal source method. *J Univ Electron Sci Technol China*, 2004, 33(5): 551
(陈昭栋. 平面热源法瞬态测量材料热物性的研究. 电子科技大学学报, 2004, 33(5): 551)

[9] Wei B C. *Modern Non-Linear Regression Analysis*. Nanjing: Southeast University Press, 1989
(韦博成. 近代非线性回归分析. 南京: 东南大学出版社, 1989)

[10] Wang X Z. *Nonlinear Parameter Estimation Theory and Application*. Wuhan: Wuhan University Press, 2002
(王新洲. 非线性模型参数估计理论与应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2002)

[11] Wang Z D, Gong Y S. *Electrical Heating Alloys*. Beijing: Chemical Industry Press, 2006
(王振东, 宫元生. 电热合金. 北京: 化学工业出版社, 2006)