

## 常功率平面热源法测试耐火材料热物性的研究

周子民, 朱再兴, 谢东江, 李浩, 陈伟, 张永星

(中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 在对常功率平面热源法基本原理深入分析的基础上, 根据其在第二类边界条件下半无限大物体一维导热的数学模型, 研制一套低导热系数材料的热物性测量装置, 并结合相关文献通过数值计算获得高斯误差补函数一次积分较为精确的解。设计的测试系统采用数据采集卡 DUT5000, 利用 VB 编程技术对温度进行实时采集及处理, 测定 8 种耐火砖和陶瓷纤维的导热系数和导温系数。研究表明, 本研究所设计的测试系统所得导热系数和导温系数与文献中的结果相对误差不超过 6%, 具有结构简单、操作方便、测试时间短、精度较高等特点。

**关键词:** 导热系数; 导温系数; 常功率平面热源法; 误差分析; 数值计算

**中图分类号:** O551.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-7207(2011)05-1467-06

## Thermal physical property of refractory material measured by plane heat source method with constant heat rate

ZHOU Jie-min, ZHU Zai-xing, XIE Dong-jiang, LI Hao, CHEN Wei, ZHANG Yong-xing

(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Based on the principle of constant heat rate source method and one-dimensional conduction mathematic model for semi-infinite object built under the second boundary condition, a set of device for measuring materials with low thermal conductivity was developed and precise analytical solution was obtained by numeric calculation in related references. The DUT5000 data acquisition card and VB software were used to conduct real-time data acquisition and data processing. The thermal diffusivity and thermal conductivity of eight kinds of firebricks and ceramic fibers were tested. The results show that the relative errors between experimental results and results from references are evaluated to be within 6%. The testing system has the characteristic of simple structure, easy operation, short testing time and high precision.

**Key words:** thermal conductivity; thermal diffusivity; plane heat source method with constant heat rate; error analysis; numeric calculation

随着能源问题的突出和能源科学的发展, 热物性学的研究越来越受到重视, 热物性学中物质热物性参数的确定也就显得尤为重要。常功率平面热源法作为一种经典的热物性测试方法, 具有测试时间短、测试原理简单等优点<sup>[1-2]</sup>。常功率平面热源法于 20 世纪 70 年代由天津大学物理工程系提出, 王补宣等<sup>[3]</sup>对测试误差的控制进行了研究, 将常功率平面热源法的累积

误差(包括方法误差、仪器误差和测量误差)控制在 6% 以内。崔萍等<sup>[4]</sup>对传统的常功率平面热源法进行了研究, 建立了改进的数学模型, 提出了新的数据处理方法。本文作者根据常功率平面热源法的原理, 利用现代先进的数据采集及计算机技术<sup>[5-6]</sup>, 自行设计了一套低导热系数材料的导温系数、导热系数测量装置, 对耐火材料和保温材料的导热系数进行测量。

收稿日期: 2010-01-14; 修回日期: 2010-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50876116)

通信作者: 周子民(1948-), 男, 山东济南人, 教授, 博士生导师, 从事热物性测试及热工设备系统仿真与优化的研究; 电话: 13974870895; E-mail: jmzhou@csu.edu.cn

### 1 理论分析

常功率平面热源法所依据的半无限大物体一维导热的数学模型及坐标如图 1 所示。

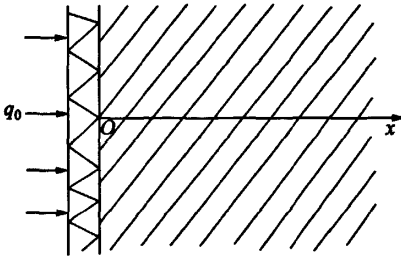


图 1 数学模型及坐标

Fig.1 Mathematical model and coordinate

在初始温度  $t_i$  分布均匀的半无限大物体的表面 ( $x=0$ ) 上, 受均匀分布的平面热源作用, 热流密度为  $q_0$ , 在常物性假设条件下, 距表面  $x$  处,  $\tau$  时刻的温升为<sup>[7-8]</sup>:

$$\Delta T_{x,\tau} = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \quad (1)$$

式中:  $\Delta T_{x,\tau}$  为温升,  $\Delta T_{x,\tau} = T_{x,\tau} - T_i$ , K;  $T_{x,\tau}$  为  $\tau$  时刻的温度, K;  $q_0$  为热流密度,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $a$  为导温系数,  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\tau$  为时间, s;  $\text{ierfc}()$  为高斯误差补函数的一次积分。

当  $\tau=\tau_0, x=0$  时,

$$\text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_0}}\right) = \text{ierfc}(0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

则

$$\Delta T_{0,\tau_0} = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (2)$$

当  $\tau=\tau_{x_1}, x=x_1$  时,

$$\Delta T_{x_1,\tau_{x_1}} = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau_{x_1}} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}\right) \quad (3)$$

用式(3)除以式(2)可得

$$\frac{\Delta T_{x_1,\tau_{x_1}}}{\Delta T_{0,\tau_0}} = \sqrt{\frac{\tau_{x_1}}{\tau_0}} \sqrt{\pi} \text{ierfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}\right) \quad (4)$$

若令

$$\phi = \frac{\Delta T_{x_1,\tau_{x_1}}}{\Delta T_{0,\tau_0}} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_{x_1}}} \quad (5)$$

$\phi$  是在实验中可以测出来的量, 由它可以求出以下值:

$$\text{ierfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \phi \quad (6)$$

若能根据式(6)求出自变量  $y = \frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}$ , 则平均温

度  $\bar{T} = \frac{1}{2}(T_{0,\tau_0} + T_{x_1,\tau_{x_1}})$  的导温系数为:

$$a = \frac{x_1^2}{4y\tau_{x_1}} \quad (7)$$

将式(7)代入式(2), 即可求出试材的导热系数  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{2q_0}{\Delta T_{0,\tau_0}} \sqrt{a\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (8)$$

以往常用的方法是测出  $\phi$ , 根据式(6)查表确定自变量  $y = \frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}$ , 本文则根据参考文献[9]介绍的方法采用数值计算确定其值。

根据参考文献[9]:

$$\text{ierfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-x_1^2}{4a\tau_{x_1}}\right) - \frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}} \text{erfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}\right) \quad (9)$$

式中:  $\text{erfc}()$  为高斯误差补函数。

将式(9)代入式(6)可得:

$$\phi = \exp\left(\frac{-x_1^2}{4a\tau_{x_1}}\right) - \sqrt{\pi} \frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}} \text{erfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}\right) \quad (10)$$

令  $y = \frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}$ , 则

$$B(y) = \exp\left(\frac{-x_1^2}{4a\tau_{x_1}}\right) - \sqrt{\pi} \frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}} \text{erfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_{x_1}}}\right) = e^{-y^2} - \sqrt{\pi} y \text{erfc}(y) \quad (11)$$

式中:

$$\text{erfc}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^\infty e^{-y^2} dy \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)得:

$$B(y) = e^{-y^2} - 2y \int_y^\infty e^{-y^2} dy \quad (13)$$

显然,  $B(y)$  即为测定的  $\phi$ 。将得到的  $\phi$  代入式(13), 并写成:

$$f(y, \phi) = e^{-y^2} - 2y \int_y^\infty e^{-y^2} dy - \phi = e^{-y^2} - \sqrt{\pi} y + 2y \int_y^\infty e^{-y^2} dy - \phi = 0 \quad (14)$$

运用 Newton 迭代法计算  $y$ , 则有

$$y_{n+1} = y_n - \frac{f(y_n, \phi)}{f'(y_n, \phi)}; n=0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

式中:  $n$  为迭代次数。将指数函数作级数展开:

$$e^{-y^2} \approx 1 + \sum_m \frac{(-y^2)^m}{m!} \quad (16)$$

取其前  $m$  项, 经积分得:

$$\int_0^y e^{-y^2} dy = y - \frac{y^3}{3} + \frac{y^5}{5 \times 2!} - \frac{y^7}{7 \times 3!} + \dots \quad (17)$$

同时, 对这个积分式进行一次微分, 有:

$$\frac{d}{dy} \left( \int_0^y e^{-y^2} dy \right) = e^{-y^2} \quad (18)$$

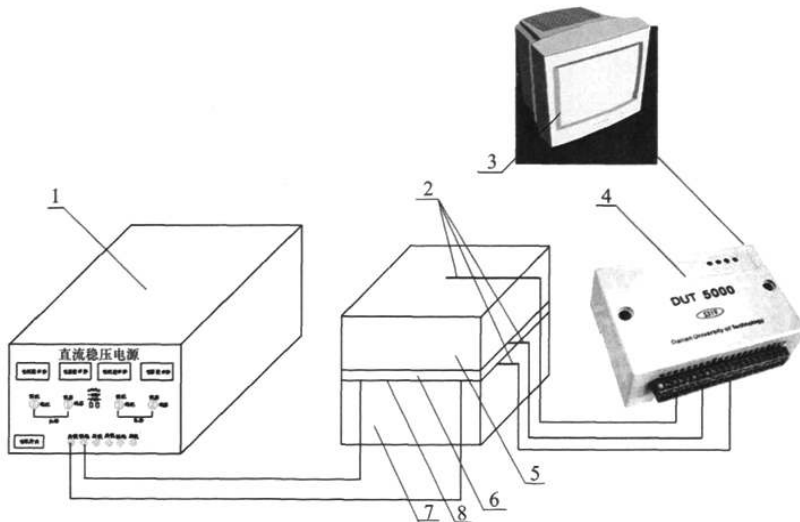
因此, 利用式(16), (17)及(18)可计算函数  $f(y, \phi)$  和该函数对  $y$  的一阶导数  $f'(y, \phi)$ 。将  $f(y, \phi)$  和  $f'(y, \phi)$  代入式(15), 经化简整理, 利用 VB 来编程计算可以算出  $y$  或  $y^2$ 。增加取项数  $m$  和迭代次数  $n$ , 可以按需要提高计算的准确度。

## 2 测试装置

测试装置如图 2 所示, 从下至上的 3 个热电偶所处的位置分别为测温点 1, 2 和 3。若试样的长和宽各为其厚度的 8~10 倍, 加热器的功率恒定, 热容量可

忽略, 并且试样无内热源, 则试样 I 可看作是“大平壁”<sup>[10-11]</sup>。由加热器通电加热时, 试样 I 的 2 个表面中央区域都在整个升温过程中保持等温面。随着加热时间的延长,  $\tau > 0$ , 试样紧挨加热器的部分首先开始升温, 并逐步向远离加热器的两边延伸, 直到  $\tau = \tau_{\text{限}}$  时, 试样 II 的上表面和试样 III 下表面也将开始升温。在  $0 < \tau < \tau_{\text{限}}$  期间, 试样 I 和 II 迭接在一起, 试样 I 和 II 以及试样 III 将表现为 2 个事实上的半无限大物体。由于试样 I 加上试样 II 的厚度与试样 III 的厚度相等, 因此, 加热器也将均等地向两侧供热, 从而解决了加热热流密度难确定的问题。

分别对黏土和石棉设置保温层和不设保温层 2 种情况进行测试, 验证试样四周对流散热对测试结果的影响, 保温材料为石棉, 保温层厚 6 cm; 对硅藻土耐火砖和灰砂砖在不同热流密度下进行测试; 对硅砖、黏土砖、硅藻土耐火砖等 8 种材料进行非稳态法(常功率平面热源法)和稳态法(平板法)测试。由于本实验的试样具有低导热系数的特点, 而且试样很薄, 成为长和宽各为其厚度的 8~10 倍的无限大平板, 从而能在试样中产生一个均匀的一维热流<sup>[12-13]</sup>, 经过足够长的加热时间后, 当测温点 1 和 2 的温度不再上升时, 便满足了平板法的测试条件, 故可利用本装置根据平板法的测试原理测试材料的导热系数。这也是本研究的一个特点: 利用本装置能同时实现常功率平面热源法和平板法对材料的导热系数进行测试, 兼顾了常功率平面热源法和平板法的优点。



1—直流稳压电源; 2—热电偶; 3—计算机; 4—数据采集卡 DUT5000; 5—辅助试样 II; 6—试样 I; 7—辅助试样 III; 8—加热器

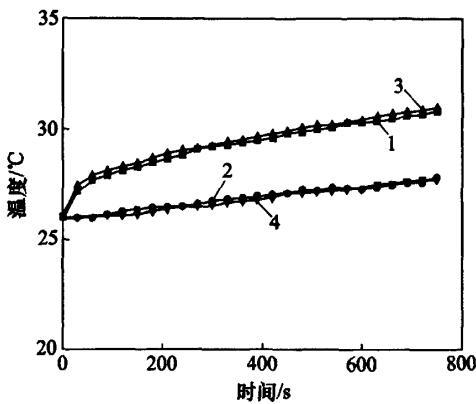
图 2 测试系统装置简图

Fig.2 Diagram of testing system

### 3 试验结果分析

#### 3.1 试样四周散热对测试结果的影响

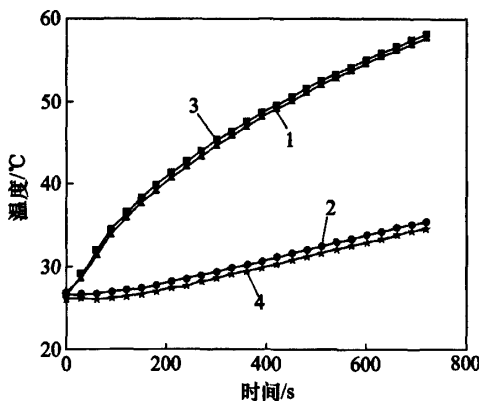
图 3 所示为保温层对黏土升温曲线的影响, 图 4 所示为保温层对石棉升温曲线的影响, 表 1 所示为试样四周设置保温层和不设保温层时所测导热系数。从图 3、图 4 和表 1 可以看出, 一方面, 在试样四周设置保温层和不设保温层时, 黏土和石棉的测温点 1 和 2 的升温曲线均较吻合, 温度随时间的变化趋势可以认为是一致的; 另一方面, 试样四周不设保温层时测



1—不设保温层时测温点 1; 2—不设保温层时测温点 2; 3—设保温层时测温点 1; 4—设保温层时测温点 2

图 3 保温层对黏土升温曲线的影响

Fig.3 Influence of insulation layer on temperature change curves for clay



1—不设保温层时测温点 1; 2—不设保温层时测温点 2; 3—设保温层时测温点 1; 4—设保温层时测温点 2

图 4 保温层对石棉升温曲线的影响

Fig.4 Influence of insulation layer on temperature change curves for asbestos

表 1 试样四周设置保温层和不设保温层时所测导热系数的比较

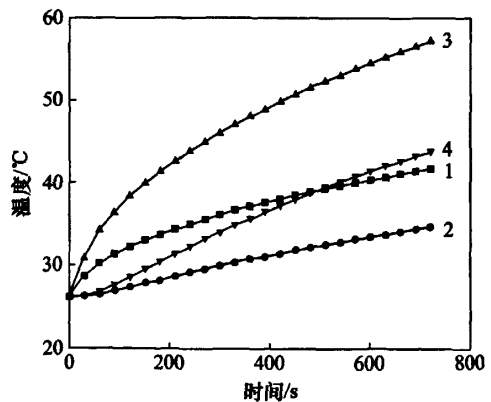
Table 1 Comparison of measuring thermal conductivity with and without insulation layer set around specimen

试样	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )		不设保温层与设置保温层的导热系数相对误差/%
	有保温层	无保温层	
黏土	0.646 3	0.640 2	0.94
石棉	0.080 9	0.080 2	0.87

得的导热系数与设置保温层时测得的导热系数相对误差不超过 1.0%, 故在精度要求不是很高时, 可以认为这 2 种情况下测得的导热系数差别很小, 加与不加保温层对实验结果影响非常小。从而说明了当试样的长和宽都为其厚度的 8~10 倍时, 试样中的导热属于一维非稳态导热, 试样四周的对流散热可以忽略。因此, 试验时, 没有必要在试样的四周设置保温层, 达到简化了实验装置的目的。

#### 3.2 热流密度对测试结果的影响

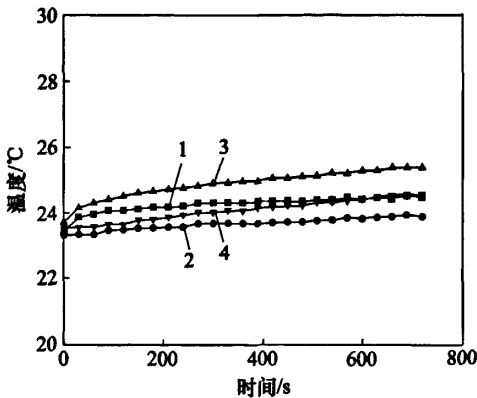
图 5 和图 6 所示分别为硅藻土耐火砖在热流密度为 191.8 和 378.8 W/m<sup>2</sup> 及灰砂砖在热流密度为 99.8 和 197.3 W/m<sup>2</sup> 的测试曲线。从图 5 和 6 可以看出: 加热器通电后的初始阶段, 测温点 1 的温度迅速升高, 此时, 测温点 2 的温度几乎没有变化, 曲线平稳, 这是因为热量还未传递到试样 1 的上表面。约 100 s 后, 测温点 1 的温度持续上升, 测温点 2 的温度也出现较大的上升趋势; 在测试结束前的最后阶段, 测温点 1 和测温点 2 的温度上升比较缓慢。整个测试过程中, 测温点 1 的温度始终高于测温点 2 的温度。结合图 5 和



1— $q_0=191.8 \text{ W/m}^2$ , 测温点 1; 2— $q_0=191.8 \text{ W/m}^2$ , 测温点 2; 3— $q_0=378.8 \text{ W/m}^2$ , 测温点 1; 4— $q_0=378.8 \text{ W/m}^2$ , 测温点 2

图 5 硅藻土耐火砖在不同热流密度下的升温曲线

Fig.5 Temperature change curves for diatomite firebrick under different heat fluxes



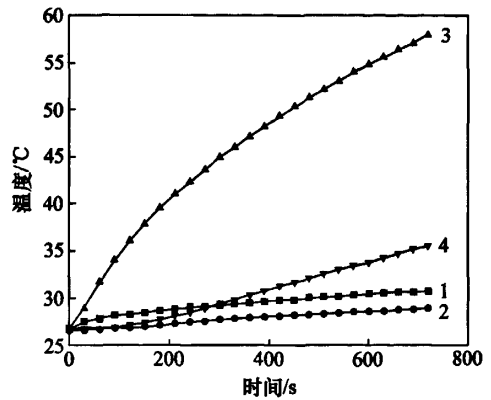
1— $q_0=99.8 \text{ W/m}^2$ , 测温点 1; 2— $q_0=99.8 \text{ W/m}^2$ , 测温点 2;  
3— $q_0=197.3 \text{ W/m}^2$ , 测温点 1; 4— $q_0=197.3 \text{ W/m}^2$ , 测温点 2  
图 6 灰砂砖在不同热流密度下的升温曲线

Fig.6 Temperature change curves for lime-sand brick under different heat flux

图 6 还可以看出: 当加热热流密度增大时, 温度上升的速率也增大; 加热热流密度越大, 温度上升得越快。

3.3 不同材料实验分析

图 7 所示为硅砖和石棉在热流密度均为  $162.7 \text{ W/m}^2$  的升温曲线。从图 7 可以看出, 加热后石棉的测温点 1 的温度迅速上升, 一段时间后测温点 2 的温度也开始上升, 约 300 s 后, 石棉的测温点 2 的温度比硅砖的测温点 1 的温度还高, 石棉测温点 1 和 2 的温差大; 而硅砖的测温点 1 和 2 的温度在整个加热过程中均上升得比较缓慢, 并且两者的温差比较小, 由表 2 可以看出: 石棉的导热系数为  $0.080 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , 硅砖的导热系数为  $1.051 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , 石棉的导热系数比硅砖的要小得多, 因此, 在相同的热流密度下, 导热系



1—试样为硅砖测温点 1; 2—试样为硅砖测温点 2;  
3—试样为石棉测温点 1; 4—试样为石棉测温点 2

图 7 不同材料的升温曲线的比较

Fig.7 Comparison of temperature change curves for different materials

数小的材料其温度上升得快。这是因为由式(8)可得:

$$\Delta T_{0,\tau_0} = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau_0} \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

当热流密度  $q_0$  和  $\tau_0$  一定时,

试样中某点的温升与导热系数成反比, 故材料的导热系数越小, 温升越大, 温度上升得越快; 反之, 导热系数越大, 温升越小, 温度上升得越慢。本装置只适合对低导热系数的材料(如保温材料和耐火材料等)进行测量。

3.4 多种材料综合误差

试验对硅砖、黏土保温砖、硅藻土耐火砖等 8 种材料分别进行了 3 组常功率平面热源法实验和 1 组平板法实验, 其测试结果和文献值的比较见表 2。由于不知道文献值是在何种条件下测出的, 而稳态法测得

表 2 8 种材料测试结果综合分析

Table 2 Comprehensive analysis of experimental results of eight materials

材料种类	导热系数 $a/$ ( $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	导热系数的 稳态值/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	与导热系数 稳态值的 相对误差/%	导热系数的 文献值 <sup>[7]</sup> / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	与导热系数 文献值的 相对误差/%
硅藻土耐火砖	3.387 6	0.227 0	0.223 8	1.43	0.220	3.18
黏土质保温砖	3.844 3	0.640 2	0.676 1	5.31	0.655 0	2.26
硅砖	8.284 0	1.051 0	0.996 3	5.49	1.089 0	3.49
石棉	2.422 9	0.080 2	0.081 1	1.11	0.078 0	2.82
灰砂砖	3.287 4	0.708 3	0.683 5	3.63	0.680 0	4.16
陶瓷纤维	1.082 4	0.066 3	0.064 9	2.18	$\leq 0.138 \text{ 0}$	—
LYGX-464 陶瓷纤维	0.712 2	0.040 8	0.041 8	2.39	0.040 0~0.053 0	—
LYGX-153 轻质耐火黏土砖	1.636 2	0.139 6	0.136 2	2.50	0.135 0	3.41

的材料导热系数要比非稳态法测得的准确些<sup>[14]</sup>, 因此, 有必要将测得的结果和稳态法得到的结果进行比较。

## 4 结论

(1) 试样边缘散热对测试结果影响比较小, 可以忽略试样四周的散热, 其导热模型属一维导热问题(只在试样的厚度方向有热量的传递, 长、宽方向均无热量的传递)。因此, 测试导热系数较低的材料时没有必要在试样边缘设置绝热保护层, 这使测试系统更加简单。

(2) 本测试系统既具有常功率平面热源法测试周期短且能同时测出材料导热系数和导热系数的优点, 又具有平板法测试准确度高、误差小的优点。

(3) 当材料的导热系数大到一定值后, 用本实验装置测试时, 其温度上升很慢, 温差非常小。本装置只适合对低导热系数的材料进行测量; 测试的 8 种低导热系数材料的导热系数和导热系数与文献参考值及稳态法测得值较吻合, 相对误差在 6% 以内。因此, 该测试方法用于测试导热系数较低的材料时, 所得导热系数具有较高的测试精度。

### 参考文献:

- [1] 王补宣, 任泽霖, 方肇洪. 利用双平板导热仪测定导热系数的测试技术和误差分析[J]. 工程热物理学报, 1982, 3(1): 1-2.  
WANG Bu-xuan, REN Ze-lin, FANG Zhao-hong. Measuring technology and error analysis on the measurement of thermal conductivity using two-plane thermal conductivity instrument[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1982, 3(1): 1-2.
- [2] Fukuyo K. Finite analytic method based on power series expansion for unsteady heat conduction problems[J]. Numerical Heat Transfer, 2004, 45(4): 369-384.
- [3] 王补宣, 韩礼钟, 王维城, 等. 同时测定绝热材料  $\alpha$  和  $\lambda$  的常功率平面热源法[J]. 工程热物理学报, 1980, 1(1): 80-87.  
WANG Bu-xuan, HAN Li-zhong, WANG Wei-cheng, et al. A plane heat source method for simultaneous measurement of the thermal diffusivity  $\alpha$  and conductivity  $\lambda$  of insulating materials with constant heat rate[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1980, 1(1): 80-87.
- [4] 崔萍, 方肇洪. 改进的常功率平面热源法[J]. 山东建筑工程学院学报, 2001, 16(2): 48-52.  
CUI Ping, FANG Zhao-hong. Improvement on the plane-source method with constant heating rate on the boundary[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2001, 16(2): 48-52.
- [5] 禹国强, 刘安伟, 张国君, 等. 恒功率平面热源法智能热物理参数测试系统[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 98-103.  
YU Guo-qiang, LIU An-wei, ZHANG Guo-jun, et al. An intelligent measuring system for thermal physical properties by plane heat source method with constant heat rate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(1): 98-103.
- [6] 王长宏, 周才民, Lamvik M, 等. 周期热流法测定金属材料热物性的实验及数值研究[J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版, 2005, 20(3): 1-2.  
WANG Chang-hong, ZHOU Jie-min, Lamvik M, et al. Numerical and experimental study on the measurement of thermophysical property of metals using periodic heating method[J]. Journal of Changsha University of Electric Power: Natural Science, 2005, 20(3): 1-2.
- [7] 陈则韶, 葛新石, 顾毓沁. 量热技术和热物性测定[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 87-99.  
CHEN Ze-shao, GE Xin-shi, GU Yu-qin. Calorimetric technology and measurement of thermophysical property[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990: 87-99.
- [8] 涂颀, 章熙明, 李汉炎, 等. 热工实验基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986: 267-324.  
TU Xie, ZHANG Xi-ming, LI Han-yan, et al. Experiment foundation of thermodynamic[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986: 267-324.
- [9] 陈昭栋, 舒维芬, 邝向军. 热导率瞬态测量的数据处理[J]. 物理实验, 2000, 20(3): 6-8.  
CHEN Zhao-dong, SHU Wei-fen, KUANG Xiang-jun. The data processing of transient measurement of thermal conductivity[J]. Physics Experimentation, 2000, 20(3): 6-8.
- [10] Kakac S, Yener Y. Heat conduction[M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1986: 109-302.
- [11] 薛正华. 周期热流法测定金属及合金导热系数的研究[D]. 长沙: 中南大学能源科学与工程学院, 2004: 1-2.  
XUE Zheng-hua. Study on the measurement of thermal conductivity of metals and alloys using periodic heating method[D]. Changsha: Central South University. School of Energy Science and Engineering, 2004: 1-2.
- [12] 陈昭栋. 平面热源法瞬态测量材料热物性的研究[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(5): 551-554.  
CHEN Zhao-dong. Investigation of transient measurement thermal physics properties by plain thermal source method[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(5): 551-554.
- [13] Incropera F P, DeWitt D P. Introduction to heat transfer[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996: 212-236.
- [14] 陈昭栋, 舒维芬, 陈丕, 等. 在瞬态自动测量仪上用脉冲法测量材料的热物理系数[J]. 物理实验, 2002, 22(10): 3-5.  
CHEN Zhao-dong, SHU Wei-fen, CHEN Pi, et al. Thermal physics coefficient measurement by pulse method with transient automatic measurement apparatus[J]. Physics Experimentation, 2002, 22(10): 3-5.

(编辑 赵俊)

# 常功率平热源法测试耐火材料热物性的研究

作者: [周子民](#), [朱再兴](#), [谢东江](#), [李浩](#), [陈伟](#), [张永星](#), [ZHOU Jie-min](#), [ZHU Zai-xing](#),  
[XIE Dong-jiang](#), [LI Hao](#), [CHEN Wei](#), [ZHANG Yong-xing](#)

作者单位: [中南大学能源科学与工程学院, 湖南长沙, 410083](#)

刊名: [中南大学学报\(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF CENTRAL SOUTH UNIVERSITY](#)

年, 卷(期): 2011, 42(5)

## 参考文献(14条)

1. 王补宣;任泽霖;方肇洪 [利用双平板导热仪测定导热系数的测试技术和误差分析](#) 1982(01)
2. Fukuyo K [Finite analytic method based on power series expansion for unsteady heat conduction problems](#)[外文期刊] 2004(04)
3. 王补宣;韩礼钟;王维城 [同时测定绝热材料 \$\alpha\$ 和 \$\lambda\$ 的常功率平面热源法](#) 1980(01)
4. 崔萍;方肇洪 [改进的常功率平面热源法](#)[期刊论文]-[山东建筑工程学院学报](#) 2001(02)
5. 禹国强;刘安伟;张国君 [恒功率平面热源法智能热物理参数测试系统](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2000(01)
6. 王长宏;周子民;Lamvik M [周期热流法测定金属材料热物性的实验及数值研究](#)[期刊论文]-[长沙电力学院学报\(自然科学版\)](#) 2005(03)
7. 陈则韶;葛新石;顾毓沁 [量热技术和热物性测定](#) 1990
8. 涂颀;章熙明;李汉炎 [热工实验基础](#) 1986
9. 陈昭栋;舒维芬;邝向军 [热导率瞬态测量的数据处理](#)[期刊论文]-[物理实验](#) 2000(03)
10. Kakac S;Yener Y [Heat conduction](#) 1986
11. 薛正华 [周期热流法测定金属及合金导热系数的研究](#)[学位论文] 2004
12. 陈昭栋 [平面热源法瞬态测量材料热物性的研究](#)[期刊论文]-[电子科技大学学报](#) 2004(05)
13. Ineropera F P;DeWitt D P [Introduction to heat transfer](#) 1996
14. 陈昭栋;舒维芬;陈丕 [在瞬态自动测量仪上用脉冲法测量材料的热物理系数](#)[期刊论文]-[物理实验](#) 2002(10)

## 本文读者也读过(10条)

1. 赵世柯. 王刚. 江莞. 黄校先. 郭景坤 [防A1203附着功能耐火材料的研究进展](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2001, 35(6)
2. 钟云志. 钟义山 [木材导温系数模型的研究](#)[期刊论文]-[西北林学院学报](#)2003, 18(2)
3. 逯兰. 朱兆军. 张喜发 [多年冻土原状样导温系数的测定](#)[期刊论文]-[低温建筑技术](#)2008, 30(6)
4. 曲月华. 王翠艳. QU Yue-hua. WANG Cui-yan [X-射线荧光光谱法测定铝质耐火材料中主次成分](#)[期刊论文]-[冶金分析](#)2006, 26(4)
5. 邸小波. 鲍崇高. 高义民. 谢振刚. 胡永年. DI Xiao-bo. BAO Chong-gao. GAO Yi-min. XIE Zhen-gang. HU Yong-nian [真空绝热板导热系数与板内真空度关系研究](#)[期刊论文]-[真空](#)2011, 48(3)
6. 赵瑞. 王新福. 刘国齐. 闫广周. Zhao Rui. Wang Xinfu. Liu Guoqi. Yan Guangzhou [连铸用浸入式水口\(SEN\)的发展](#)[期刊论文]-[河南冶金](#)2006, 14(4)
7. 谷和平. 张景峰. 丁健. GU He-ping. ZHANG Jing-feng. DING Jian [瞬态热流法导温系数测试装置与软件开发](#)[期刊论文]-[测控技术](#)2006, 25(12)
8. 纪玉超. 张双喜. 胡开永. 陈婷婷. JI Yu-chao. ZHANG Shuang-xi. HU Kai-yong. CHEN Ting-ting [圆管法导热系数测量的试验研究](#)[期刊论文]-[青岛理工大学学报](#)2009, 30(3)
9. 龚红菊. 孙远见. GONG Hong-ju. SUN Yuan-jian [稻谷的导温系数测定方法研究](#)[期刊论文]-[云南农业大学学报](#) 2006, 21(3)

10. [高兴勇](#), [GAO Xingyong](#) [大型钢锭在高温炉中加热时导温系数的计算](#)[期刊论文]-[热加工工艺](#)2010, 39(19)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_zngyxxb201105047.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zngyxxb201105047.aspx)