

材料热物理性能非稳态测量方法综述

于帆¹ 张欣欣¹ 何小瓦²

(1. 北京科技大学机械工程学院热能工程系, 北京 100083;

2. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

摘要 非稳态法具有快速、准确的特点, 一次测量可同时得到热导率、热扩散率和热容等多个热物性参数, 测试范围可覆盖多种材料和较宽的热参数区间。阐述了目前国际上主要的六种非稳态测量方法及特点、测量原理及理论模型公式。

关键词 导热性 热扩散系数 热物理性质 瞬态法 测量

A Review of The Measurements of Thermophysical Properties of Materials by Transient Method

YU Fan¹ ZHANG Xin-xin¹ HE Xiao-wa²

(1. Department of Thermal Energy Engineering, School of Mechanical Engineering,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The transient methods have the virtues of being fast and apparently accurate, and can obtain the thermal conductivity, the thermal diffusivity and the heat capacity of the materials simultaneously just by one measurement, covering a wide range of materials and thermal property values. Six types of transient methods predominantly used worldwide are introduced, their characteristics, measurement principles and the theoretical models or equations are described in detail.

Key words Thermal conductivity Thermal diffusivity Thermophysical property Transient method Measurement

1 引言

热导率、热扩散率和比热与传热过程密切相关,分别反映物质传热量、传播温度变化和吸收热量的能力,是物质非常重要的热物理性能参数,也是进行绝热设计和分析计算不可或缺的关键参数。热导率的测量方法一般可分为稳态法和非稳态法两大类,稳态法指的是实验中待测试样上温度分布达到稳定后进行测量,其分析的出发点是稳态的导热微分方程,能直接测得热导率。其特点是实验公式简单,实验时间长,需要测量导热量(直接或间接)和若干点的温度。

非稳态法指的是实验测量过程中试样温度随时间变化,其分析的出发点是不稳态导热微分方程。测量原理是对处于热平衡状态的试样施加某种热干扰,同时测量试样对热干扰的响应(温度随时间的变化),然后根据响应曲线确定试样材料热物性参数的数值。在非稳态测量方法中,测量信号是时间的函数,因而可以分别或同时得出热导率、体积热容,以及组合参数如热扩散率、蓄热系数等。

近二十年来,随着各种新材料和改良材料在物理、化学、生物及医疗领域获得迅速发展与广泛应用,同时也导致了对材料热性能数据的巨大需求。而传统的热性能测试方法,由于要求大尺寸的试样、测量过程比较费时或者装置过于复杂,已不能满足这种需求,正是在这样的背景下,研究者们开发出各种实用的接触式非稳态测量方法,也可称作瞬态法或动态法。非稳态法具有很多优点,快速、准确,一次测量可同时得到多个热参数,方式灵活多样,测试范围可覆盖多种材料、较宽的温度和热参数区间。目前基于非稳态法原理的仪器颇受欢迎,有些自动化程度很高而且已经商业化,并开始在世界范围内销售。

非稳态测试仪器应该使用标准材料试样进行标定和验证,另外实验方法及数据处理方法也应当规范和标准化,以便尽可能地避免测量结果的偏差和不一致性。所以,建立国际上通用的非稳态法测量标准就显得尤为迫切和重要,2002年在英国召开的第16届欧洲热物性会议上(ECTP2002),第一个专题研讨会的议题就是关于非稳态测量方法标准的建立。

相对于非接触式非稳态测量方法,如技术上已经发展很成熟的激光脉冲法(laser-flash)。目前国际上主流的材料热物理性能接触式非稳态测量方法主要有六种:即热线法(transient hot-wire)、热探针法(non-steady state probe)、热带法(transient hot-strip)、脉冲平面热源法(plane source-pulse transient)、阶跃平面热源法(plane source-stepwise transient)及热盘法(transient plane source-Gustafsson hot-disc technique),并且国际热物性工作组已着手起草了相关的暂行测试方法标准,这对我国广大热物性学工作者来说,既是挑战也是机遇。

针对不同的试验温度范围和具有不同热导率数值范围的材料,需要采用不同的测试方法,因为至今还没有一种测试方法能够适用于所有的材料和所有的温度范围。在选定一种合适的测试方法时,一定要考虑以下因素:材料的物理特性,把试样加工成所需几何形状的可能性和难易程度,所需的测试准确度,测试周期的长短,建立测试装置所需的时间和资金等。

2 热线法

热线法^[1~3]可测量固体、粉末和流体的热导率,温度范围从低温到1800 K。也能同时得到比热和热扩散率,但准确性较差。它有三种基本测试形式:交叉热线、平行热线和热电阻式热线。交叉热线法适用的热导率区间在 $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \sim 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,平行热线法最高可测至 $25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。另外,热线法既可用于各向同性也可用于各向异性材料,材料可以是均质的也可以是非均质。

热线法的原理如图1和图2所示,将一根均匀细长的金属丝(线)埋设在待测试样的凹槽内或者紧密夹持在两块试样中,当有电流通过时,细丝内就有热量产生,热量沿径向在试样中传导。测量并记录细丝的温度响应(温升随时间的变化)或距细丝某个距离处的温度响应,然后根据细丝—试样实验系统的传热数学模型及温度变化的理论公式就可计算出被测试样的热物性参数。在交叉热线和平行热线法中,温度响应通过焊接在热线上的热电偶或布置在试样内的热电偶测量得到。而在热电阻式热线法中,热线本身既是加热元件也

是测温元件,温度响应是通过测量热线本身的电阻变化来获得的,不需要设置另外的热电偶。最常用的热线材质是纯铂,其它已知电阻温度系数的性能稳定的电热金属也可以,热线典型的长度为100 mm~200 mm,直径为 $\Phi 25 \mu\text{m} \sim \Phi 500 \mu\text{m}$,测量液体时其直径可小到 $\Phi 5 \mu\text{m}$ 。

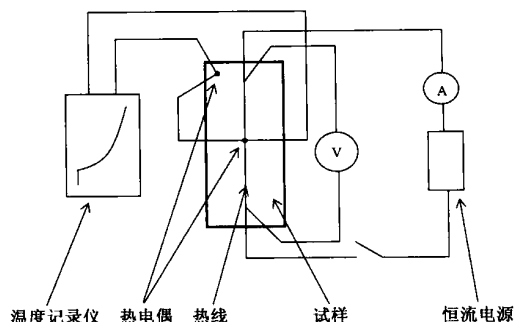


图1 交叉热线法示意图

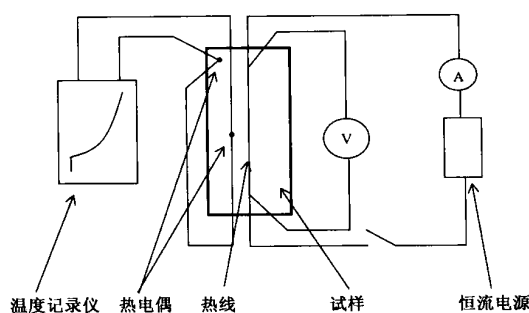


图2 平行热线法示意图

热线法温度响应的理论公式如下

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[-Ei \left(-\frac{r^2}{4at} \right) \right] \quad (1)$$

式中: $\Delta T(r, t)$ ——温升,即温度与系统初始平衡温度之差($T - T_0$); r ——半径; t ——时间; λ 和 a ——试样的热导率和热扩散率; $-Ei(-z)$ ——指数积分函数; q ——热线上每单位长度的发热量, $q = P/l$, P 为恒定的电加热功率, $P = UI$ 。

当加热一定时间后,即满足条件: $\sqrt{4at} \gg r$,可得到简化的公式

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln t + \ln \frac{4a}{C_E r^2} \right] \quad (2)$$

式中: $C_E^* = \exp C_E$; C_E ——欧拉常数(0.577 2)。

对于热电阻式的热线法,温度响应通过测量热线上的电压变化来获得

$$\Delta U(r_0, t) = \frac{\alpha U_0^2 I}{4\pi \lambda} \left[\ln t + \ln \frac{4a}{C_E r_0^2} \right] \quad (3)$$

式中: α ——热线的电阻温度系数; r_0 ——热线的半径。

如果画出温升 $\Delta T(r, t)$ 随对数时间 $\ln t$ 的变化曲线,曲线呈线性变化趋势,直线的斜率为 $m = q/(4\pi\lambda)$,截距为 $n = m \ln[4a/(C_E^* r^2)]$,据此可以得到被测试样的热导率 λ 和热扩散率 a

$$\lambda = \frac{q}{4\pi m} \quad (4)$$

$$a = \frac{C_E^* r^2}{4} \exp \left(\frac{n}{m} \right) \quad (5)$$

由式(5)可见,热扩散率 a 的测量误差较大,因为理论上要求热线要非常细,即 $r \rightarrow 0$,半径 r 的数值太小将会导致无法获得很准确的热扩散率值。所以,如果采用交叉热线法的话,一般只能测得热导率。热导率 λ 的测量精度取决于温度 T 和发热量 q 的测量精度,一般测量误差可以控制在3%左右甚至更小。

3 热探针法

热探针法^[4,5]的原理也是基于热线法,只不过用探针取代了热线,可以测量各种均质固体和粉末状材料的热导率和比热,也可以测量非均质的多孔材料,温度范围为 $-50^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$,热导率测量区间为 $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) \sim 20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。热探针法对于测量一些熔融材料、粉末或者含湿材料特别适合,还可以现场和野外作业。实验室用的热探针长度通常为200 mm,直径为 $\Phi 1 \text{ mm} \sim \Phi 2 \text{ mm}$ 。

热探针法的原理如图3所示,折叠的或者螺旋型的细金属加热丝,以及测温元件被封装在一根细长的薄壁金属管内,互相之间要保持绝缘。在一定时间里对探针加热,同时测量并记录探针的温度响应,然后根据探针—试样实验系统的传热数学模型及温度变化的理论公式就可计算出被测试样的热物性参数。

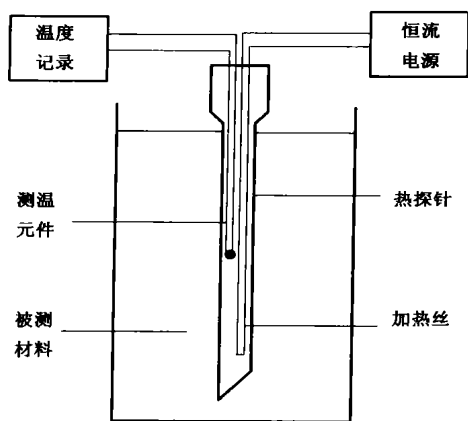


图3 热探针法示意图

热探针法温度响应的理论公式或模型有两种, 一种为理想线热源模型, 与热线法模型相同

$$\Delta T(r, t) = A \ln t + B, [t \gg r^2 / (4a)] \quad (6)$$

式中: $A = q / (4\pi\lambda)$, $B = (q / 4\pi\lambda) \cdot [\ln(4a / r^2) - C_E]$

另一种是较为精确的 Jaeger 修正模型

$$\Delta T(r, t) = A \ln t + B + (D + E \ln t) / t, (t \gg \varphi_d^2 / a) \quad (7)$$

式中: $A = q / (4\pi\lambda)$ (8)

$$B = [q / (4\pi\lambda)] [\ln(4a / (r^2 C_E^*)) + 4\pi\lambda(\Gamma + W)] \quad (9)$$

$$D = [(qcr^2) / (8\pi\lambda^2)] [(1 - c_p / c) \ln(4a / (r^2 C_E^*)) + 1 - (4\pi\lambda c_p(\Gamma + W) / c)] \quad (10)$$

$$E = [(qcr^2) / (8\pi\lambda^2)] (1 - c_p / c) \quad (11)$$

式中: φ_d ——探针的外直径; Γ, W ——探针与试样之间的接触热阻以及探针的内部热阻; c_p, c ——探针和试样的体积热容, 其它符号同热线法。

若采用理想线热源模型, 热导率 λ 的测量误差与被测材料的结构有关, 对于含湿的细颗粒材料误差约为 5%, 而对于干燥的粗颗粒材料误差有可能超过 10%。若采用较为精确的 Jaeger 修正模型, 热导率 λ 的测量误差为 3% ~ 5%, 体积热容 c 的误差比较大, 约为 20%。在现场野外作业时, 测量误差通常最小也会达到 10%。

4 热带法

热带法^[6,7]测量原理类似于热线法, 不同之处是用很薄的窄金属带(热带)来替代热线, 如图4所示。实验中将薄金属带夹持在待测材料中间, 从某时刻起以恒定电功率加热金属带, 测量并记录热带的温度响应曲线, 根据温度变化的理论公式可同时得到被测材料的热导率和热扩散率。热带法不仅可以测量液体、松散材料、多孔介质及非金属固体材料, 并且在热带表面覆着一很薄的绝缘层之后, 还可用于测量金属材料, 适用范围较广, 而且实验装置易于实现。与圆柱状电加热体相比, 薄带状电加热体与被测固体材料有更好的接触状态, 故热带法比热线法更适宜于测量固体材料, 而且热扩散率的测量结果也较热线法精确, 另外热带比细的热线要更加结实耐用一些。热带的温度变化可以通过测量热带电阻的变化来获得, 也可以通过在热带表面上焊接热电偶来直接测量。

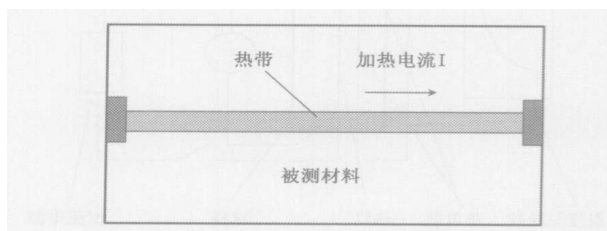


图4 热带法示意图

最常用的热带材质是纯铂, 其它已知电阻温度系数的性能稳定的金属也可以, 热带典型的长度为 100 mm ~ 200 mm, 宽度为 3 mm ~ 5 mm, 厚度为 10 μ m 或更小。

热带法温度响应的理论公式或模型如下

$$\Delta T(t) = \frac{q}{2\sqrt{\pi\lambda}} \left\{ \tau \operatorname{erf}(\tau^{-1}) - \frac{\tau^2}{\sqrt{4\pi}} [1 - \exp(-\tau^{-2})] - \frac{1}{\sqrt{4\pi}} Ei(-\tau^{-2}) \right\} \quad (12)$$

式中: $\tau = \frac{\sqrt{4at}}{w_h}$, w_h ——热带宽度; $\operatorname{erf}(z)$ ——误差函数; q ——热带每单位长度的加热热流。

当加热一定时间, 即 $\sqrt{4at} \gg w_h$ 时, 可得简化公式

$$\Delta T(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln t + \ln \frac{45a}{w_h^2} \right] \quad (13)$$

对于热电阻式的热带法, 温度响应是通过测量热带上的电压变化来获得

$$\Delta U(t) = \frac{\alpha U_0 I}{4\pi l \lambda} \left[\ln t + \ln \frac{45a}{w_h^2} \right] \quad (14)$$

如果画出温升 $\Delta T(t)$ 或电压 $\Delta U(t)$ 随对数时间的变化曲线, 曲线呈线性变化趋势, 直线的斜率为 $m = q/(4\pi\lambda)$, 截距为 $n = m \ln[45a/(w_h^2)]$, 据此可以得到被测试样的热导率 λ 和热扩散率

$$\lambda = \frac{\alpha U_0 I}{4\pi l m} \quad (15)$$

$$a = \frac{w_h^2}{45} \exp\left(\frac{n}{m}\right) \quad (16)$$

由式(16)可见, 热扩散率的测量误差比热线法要小得多, 因为 w_h 的数值 (1 mm ~ 10 mm) 比热线的半径大的多, 可保证热扩散率值达到满意的精度。热导率的测量误差一般在 3%, 热扩散率 a 的测量误差可以控制在 4% 左右。

5 脉冲式平面热源法

脉冲式平面热源法^[8]可以测量均质固体材料、非均质材料以及多孔材料, 可同时得到热导率、比热和热扩散率, 温度范围从 -40 °C 至 400 °C, 热导率测量区间从 0.05 W/(m·K) 到 50 W/(m·K)。测量原理如图 5 所示, 给平面热源通以脉冲式的加热电流 (持续时间为 t_0), 同时用热电偶或热电阻元件测量距热源为 x 位置处材料的温度变化 $T(x, t)$, 根据热源—试样测量系统的传热数学模型及其非稳态导热方程的解析解, 可以确定被测材料试样的热物性参数。

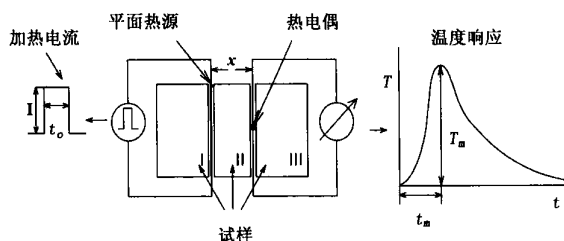


图5 脉冲式平面热源法示意图

脉冲式平面热源法温度响应的理论公式或模型如下:

对于理想脉冲加热 (持续时间 t_0 很短)

$$T(x, t) = \frac{Q_1 \sqrt{a}}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{\pi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \quad (17)$$

式中: $T = T(x, t)$ —— 过剩温度, 表示物体真实温度与系统初始温度之差; 脉冲能量 $Q_1 = I^2 R t_0 / (2A)$; I —— 加热电流; R 和 A —— 热源电阻和面积。

由上式看到, 根据温度响应曲线的最大值 T_m 及对应的时间 t_m , 就可直接计算出热扩散率 a 和热导率 λ

$$a = \frac{x^2}{2t_m} \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{Q_1 x}{2 \sqrt{\pi} \exp(1) T_m t_m} \quad (19)$$

则体积热容 $\rho c = \lambda/a$ 。

如果温度响应曲线在最大值附近数据不够稳定, 则需采用曲线拟合或最小二乘参数估计方法^[11]来计算热扩散率 a 和热导率 λ 。

对于方脉冲加热 (持续时间 t_0 较长)

$$T(x, t) = \frac{2q_1 \sqrt{a}}{\lambda} \left\{ \sqrt{t} \cdot \operatorname{ierfc}\left[\frac{x}{\sqrt{4at}}\right] - \sqrt{t-t_0} \cdot \operatorname{ierfc}\left[\frac{x}{\sqrt{4a(t-t_0)}}\right] \right\} \quad (20)$$

式中: $q_1 = I^2 R / (2A)$, $\operatorname{ierfc}(z)$ —— 余误差函数 $\operatorname{erfc}(z)$ 的一次积分函数。

通过曲线拟合或最小二乘参数估计方法^[11], 从实验测得的温度响应曲线就可以同时计算出热扩散率 a 和热导率 λ 。

平面热源的形状如图 6 所示, 典型材料为镍箔, 厚度为 10 μm ~ 20 μm , 电阻值为 1 Ω ~ 10 Ω 。平面热源的每个表面用绝缘薄层包覆。脉冲式加热电流为 0.5 A ~ 7 A。

测温元件采用直径 70 μm ~ 100 μm 的热电偶或者很薄的热电阻, 在布置测温元件时, 应在试样表面上刻出凹槽以容纳测温元件, 凹槽的深度取决于测温元件的直径。

测量误差或不确定性的分析基于公式(17)~(20),假定已满足理想模型条件,并且温度数据处于合适的窗口范围之内, λ 和 a 的误差约为4%左右。

6 阶跃式平面热源法

阶跃式平面热源法^[9]的测量原理与脉冲式类似,只不过加热电流为阶跃形态,如图7所示。

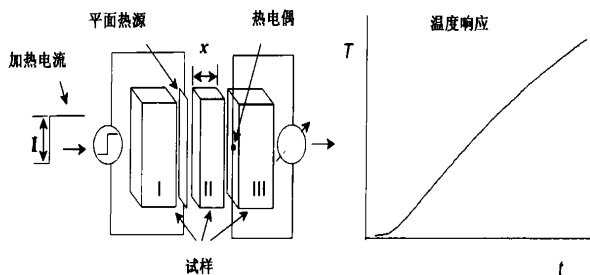


图7 阶跃式平面热源法示意图

阶跃式平面热源法温度响应的理论公式或模型如下

$$T(x, t) = \frac{q_1}{\lambda} \sqrt{a} \left\{ 2 \sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) - \frac{x}{\sqrt{a}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right) \right\} \quad (21)$$

式中: $\operatorname{erfc}(z)$ —— 余误差函数。

通过曲线拟合或最小二乘参数估计方法^[11],从实验测得的温度响应曲线就可以同时计算出热扩散率 a 和热导率 λ ,则体积热容 $\rho c = \lambda/a$ 。

7 热盘法

热盘法^[10]可以测量很多不同类型的材料,如金属、非金属固体,粉末、液体以及薄膜材料等。材料可以是各向同性、也可以各向异性,可同时得到热导率、热扩散率和体积热容,温度范围从低温至高温,热导率测量区间非常宽广,可覆盖大多数材料。测量原理如图8所示,一个很薄的金属圆盘(片)或方盘被夹持在两块待测材料试样当中,在一定时间内给金属盘通以恒定的加热电流,同时测量热盘的温度响应,根据热盘—试样测量系统的传热数学模型及

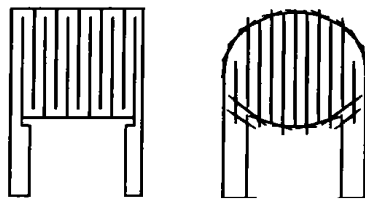


图6 平面热源形状示意图

其非稳态导热方程的解析解,可以确定被测试样的热物性参数。实验中,热盘既是加热元件同时也是测温元件,温度变化是通过测量热盘热电阻的变化(或电压变化)来获得。

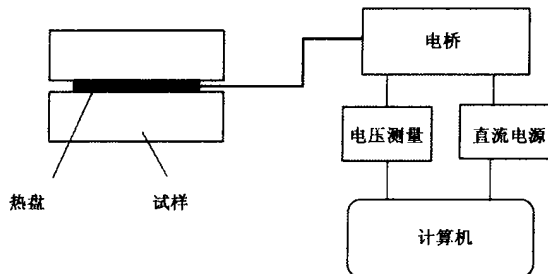


图8 热盘法示意图

热盘法温度响应的理论公式或模型如下

$$\Delta T(t) = \Delta T(t)_i + \Delta T(t)_s \quad (22)$$

式中: $\Delta T(t)_i$ —— 热盘本身绝缘层的初始温升,一般经过很短的时间后就趋于恒定; $\Delta T(t)_s$ —— 试样内的温升。

对于圆形热盘

$$\Delta T(\tau)_s = P_0 (\pi^{3/2} r \lambda)^{-1} D(\tau) \quad (23)$$

$$D(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^\tau d\sigma \sigma^{-2} \cdot \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(-\frac{(l^2+k^2)}{4m^2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2m^2\sigma^2}\right) \right] \quad (24)$$

式中: $\tau = (t/\theta)^{1/2}$, $\theta = r^2/a$, r ——热盘的半径; P_0 ——热盘的加热总功率; m ——热盘内发热圆环的数目; $I_0(z)$ ——修正的贝塞尔函数; λ 和 a ——试样的热导率和热扩散率。

对于方形热盘

$$\Delta T(\tau)_s = P_0(4\pi^{1/2}b\lambda)^{-1}H(\tau) \quad (25)$$

$$H(\tau) = \int_0^\tau dv \{ \operatorname{erfv}^{-1} - \pi^{1/2}v[1 - \exp(-v^2)] \}^2 \quad (26)$$

式中: b ——方热盘边长的一半; $\operatorname{erfv}(z)$ ——误差函数。

热盘实际是一个热电阻, 其电阻变化为

$$R(t) = R_0[1 + \alpha(T(t))]$$

式中: R_0 ——加热开始前的初始电阻值; α ——电阻温度系数。

通过曲线拟合或最小二乘参数估计方法^[11], 从实验测得的温度响应曲线就可以同时计算出热扩散率 a 和热导率 λ , 则体积热容 $\rho c = \lambda/a$ 。热盘的形状如图9所示, 典型材料为镍或钼, 金属箔厚度为 $10 \mu\text{m}$, 每个表面用 $25 \mu\text{m}$ 厚的绝缘薄层包覆。热导率的测量误差在常温下为 $2\% \sim 5\%$, 高温时为 $5\% \sim 7\%$; 热扩散率的测量误差在常温下为 $5\% \sim 10\%$, 高温时为 $7\% \sim 13\%$ 。

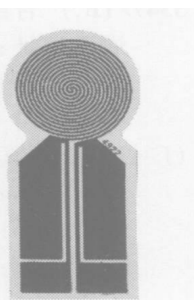


图9 平面热源形状示意图

8 结束语

非稳态法相对于稳态法尽管有许多优势, 但在实际应用中还是存在以下许多问题需要慎重考虑和认真研究:

(1) 相对于稳态法, 非稳态法具有测试过程短的特点, 而这个特点在实际应用中具有重要的意义, 如

在十几秒内的人工微重力环境下的液体传热性能测试等。但特别需要注意的是这种短的测试过程也是首先以被测对象的整体温度达到稳定为前提的。因此, 从整个实际测试过程来衡量, 特别是在带有温度环境要求的条件下, 非稳态法相对于稳态法并没有多少明显的优势。

(2) 理论上, 以上的几种非稳态法可以覆盖比较宽的材料种类。但由于实际工程实现时有时很难达到理论模型的要求, 因此, 在一定的误差范围内, 每种方法都有各自性能参数的覆盖区间。

(3) 非稳态法是采用对处于热平衡状态的试样施加某种热干扰并同时测量试样对热干扰的响应来获得相应的热物性参数。在实际应用中, 试样对热干扰的响应往往非常微弱, 但却要求对这些微弱响应的测量速度较快且准确度很高, 这样会在实际应用中带来一系列的问题, 如被测样品加热过程中的干扰会严重影响测量信号, 由此为了保证测量准确度, 有时会要求在测试过程的短时间内停止对样品加热, 但短时间停止加热又不能对被测样品的稳定温度场造成影响, 这样就不得不采用热惰性很大的样品加热炉, 其负面后果就是被测样品的温度变化过程漫长且不容易控制, 在 300°C 以下尤为明显。

(4) 以上介绍的几种非稳态法, 它们的传热方向都完全不相同, 分别是点状、一维状和四散状热流方向的热源, 由此所测试出来的热物理性能参数具有不同的方向性, 这点在实际研究和使用中要特别注意。

综上所述, 非稳态法具有快速、准确的特点, 一次测量可同时得到热导率、热扩散率和热容等多个热物性参数, 方式灵活多样, 测试范围可覆盖多种材料、较宽的温度和热参数区间, 其突出的特点之一就是可以应用于现场质量控制和监测。目前, 国际热物性工作已着手起草了相关的暂行测试方法标准, 这对我国广大热物性学工作者来说, 既是挑战也是机遇, 应当加强这方面研究的力度, 以适应和满足国民经济各部门以及高新技术飞速发展对材料热物性数据的需求。

参考文献

- [1] Healy J J, de Groot J, Kestin J. The theory of the transient hot wire method for measuring thermal conductivity. Physica,

- 1976(82): 392~408.
- [2] Davis W R, Downs A M. The hot-wire test -A critical review and comparison with the BS 1902 Panel Test, Trans. Br. Ceram. Soc., 1980, 79(2): 44.
- [3] Zhang X, Degiovanni A, Maillat D. Hot-wire measurement of thermal conductivity of solids: a new approach, High Temp.-High Press., 1993(25): 577~584.
- [4] Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure, American Society for Testing and Materials, 2000, D5334-00.
- [5] Standard test method for thermal conductivity of plastics by means of a transient line-source technique, American Society for Testing and Materials, 2001, D5930-01.
- [6] Gustafsson S E, Karawacki E, Khan M N. Transient-hot-stripe method for simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and fluids, J Phys. D: Appl. Phys., 1979(12): 1411~1421.
- [7] Gustafsson S E, Karawacki E, Chohan M A. Thermal transport studies of electrically conducting materials using the transient hot-stripe technique, J Phys. D: Appl. Phys., 1986(19): 727~735.
- [8] Kubicar L. Pulse method of measuring basic thermophysical parameters in Comprehensive Analytical Chemistry. Vol. XII, Thermal Analysis Part E, (Ed. Svehla G., Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier), 1990: 350.
- [9] Kubicar L, Bohac V. Review of several dynamic methods of measuring thermophysical parameters in Proc. of 24th Int. Conf on Thermal Conductivity / 12th Int. Thermal Expansion Symposium October 26~29 1997, (Eds Gaal P S and Apostolescu D E, Lancaster: Technomic Publishing Company), 1998: 135~149.
- [10] Gustafsson S E. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurement of solid materials, Rev. Sci. Instrum., 1991, 62(3): 797~804.
- [11] Beck J V, Arnold K J. Parameter Estimation in Engineering and Science. New York: John Wiley, 1977.

欢迎订阅《计测技术》

邮发代号: 80—441

《计测技术》创刊于 1958 年, 是面向国内外公开发行的计量测试技术类期刊, 双月刊, 逢双月 20 日出版。

《计测技术》是中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊, 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊, 中国期刊全文数据库全文收录期刊, 中文科技期刊数据库收录期刊。

国际刊号: ISSN 1002—6061, 国内刊号: CN 11—

5347/TB, 广告经营许可证: 京海工商广字第 0341 号

通讯地址: 北京 1066 信箱杂志社

邮政编码: 100095

电话: 010—62457159 (编辑部), 010—62457160 (广告部), 传真: 010—62457159

Email: mmt304@126.com

网址: <http://hkjc.chinajournal.net.cn>

国内定价: 8 元/册 全年定价: 48 元

《计测技术》2006 年第 4 期目录

几种现代湿度测量方法评述

激光跟踪测量系统

基于 GSM/GPRS 的无线监控系统设计

滞止式温度传感器动态理论建模研究

正弦波形畸变和失真度的分析

直升机发动机扭矩测控系统现场校验装置

18 位高精度数据采集系统的设计

建立室内虚拟长度基线场的可行性探讨

基于 AD598 模块的圆度仪数字化改造

智能车辆视觉系统的障碍物边缘检测

一种微球球径测量的新方法

微波测量中电缆线变化的校正方法

小驻波微波器件驻波比的测量方法及不确定度分析

脉冲信号源脉宽参数的测量不确定度分析

基于 LPC2210 微控制器的液晶显示系统设计

基于 FPGA 的 1553B 总线编解码器的设计与实现

发动机质心测试系统软硬件设计

军事计量人员能力评价

校准/测试实验室通用信息管理系统设计

进出气口面积比对温度传感器恢复特性的影响

开盖角度测量工装的检测

基于 Word 的检定证书自动生成系统