

平面热源法瞬态测量材料热物性的研究

陈昭栋

(西南科技大学理学院 四川 绵阳 621002)

【摘要】简述了平面热源法瞬态测量材料热物理性质的基本原理，分析了快速法、脉冲法测量存在的问题。在此基础上，研究了材料热物性瞬态自动测量技术。测量实践表明：瞬态自动测量仪测量准确可靠，与用防护热板法测量的结果也符合得很好。

关键词 热导率；热扩散系数；瞬态自动测量；平面热源；脉冲法

中图分类号 O551.3 文献标识码 A

Investigation of Transient Measurement Thermal Physics Properties by Plain Thermal Source Method

Chen Zhaodong

(Southwest University of Science and Technology Sichuan Mianyang 621002)

Abstract At present paper, we recite the basic principle of plane hot fountain to measure the heat physical property instantly and analysis the problem between the instant measurement and pulse measurement. basic on this, We study the instant automatic measurement technology of the heat physical property. Our practice indicated that instant automatic measurement is exact and credible, accord with the result of plane heat measurement well.

Key words thermal conductivity; thermal diffusion coefficient; transient automatic measurement; plain thermal source; pulse method

材料的热导率、热扩散系数、比热、密度和蓄热系数等材料热物理性质的瞬态测量，是一个由来已久的经典问题，虽然发展了多种研究方法，但至今并没有真正解决。现仅就平面热源法测量作简要讨论。

为了简化问题，便于安排实验测量，通常只研究一维热传导的情况。对于均匀的无限大固体材料，若其中用一个理想的平面恒流热源(发热强度 q 不随时间变化)加热，热流只在垂直于面热源的方向上传播。当温度变化不大时，试件的体积膨胀也可以略而不计，试件中的热传导问题，若用温度变化的分布 $J(x, t) = T(x, t) - T(x, 0)$ 来表示，则可以归结为求解如下的定解问题。即

$$rc_p \frac{\partial J(x, t)}{\partial t} = l \frac{\partial^2 J(x, t)}{\partial x^2} \begin{cases} J(x, 0) = 0 & t = 0, x > 0 \\ q = -2l \frac{\partial J(0, t)}{\partial x} & t > 0, x = 0 \\ J(\infty, t) = 0 & t > 0, x \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1)$$

式中， $r = m/(Ax)$ 。表密度； c_p 为定压比热容； l 即热导率。通常定义： $a = l/(rc_p)$ 叫热扩散系数。它们都是表征材料热物理性质的重要物理量，了解它们，对科学研究和技术应用有着十分重要的意义。

收稿日期：2003-04-07

作者简介：陈昭栋 (1943-)，男，教授，主要从事物理、热学和光学方面的研究。

2 快速法测量

快速法,有的也称恒流法或常功率法^[1,2]。它是指在瞬态加热测量过程中,平面热源的发热强度不随时间而变化。即 q 为恒矢量。

1.1 快速法的测量原理

为从式(1)解出 $0 \leq x < \infty$ 区间内各点 t 时刻的温度变化,可对式中的时间变量 t 作完全的拉氏变换(即对偏微分方程和边界条件都作拉氏变换),设象函数记为 $\overline{J}(x, p)$,变换后得到

$$\frac{\partial^2 \overline{J}(x, p)}{\partial x^2} = \frac{p}{a} \overline{J}(x, p) \begin{cases} \overline{J}(x, p) = 0 & t = 0, x = 0 \\ \frac{q}{p} = -2I \frac{\partial \overline{J}(x, p)}{\partial x} & t > 0, x = 0 \\ \overline{J}(x, p) = 0 & t > 0, x \rightarrow \infty \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)解得, t 时刻试件中 x 处的温度变化为

$$J(x, t) = \frac{q}{I} \sqrt{\frac{at}{\pi}} B(y) \quad (3)$$

式中

$$B(y) = e^{-y^2} - 2y \int_y^\infty e^{-y_1^2} dy_1 \quad (4)$$

$$y^2 = \frac{x^2}{4at} \quad (5)$$

令 $x=0$,因而 $y=0$,得到 $B(y)=1$ 。表示试件紧贴热源表面处, t 时刻的温度变化为

$$J(0, t) = \frac{q}{I} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \quad (6)$$

联立式(3)、(6),可以解得

$$J(0, t) / J(x, t) = B(y) \quad (7)$$

在式(7)中, t 时刻试件 $x=0$ (热面)和 $x=x$ 处(冷面)的温度变化都是实验中可以直接测量的物理量。因而,只要同时测出 $J(0, t)$ 和 $J(x, t)$,并用此测量值代入式(7),即可算出 $B(y)$ 的值。将计算得到的 $B(y)$ 值代入式(4),可解得文献[3] y 值。用解得的 y 值代入式(5),即得到试件材料的热扩散系数 a 。

当采用电加热时,平面热源的发热强度 q 可用加热片的电阻 R 、加热电流 I 和有效发热面积 A 等可测参数表达。考虑到加热片自身吸热的影响,加热片的有效发热强度为

$$q = \frac{1}{A} (I^2 R - m_0 c_{p0} \frac{\Delta J(0, t)}{\Delta t}) \quad (8)$$

式中 m_0, c_{p0} 为加热片有效加热面积的质量和比热。将式(5)、(8)得到的热扩散系数代入式(6),即得试件材料的热导率。这就是快速法瞬态测量热扩散系数和热导率理论基础。

1.2 快速法测量结果的分析

在材料热物性瞬态自动测量仪上,用快速法测量材料的热物理性质时,应注意到下述特点:

1) 对同一种材料,热扩散系数和热导率测量的重复性和测量精确度都较高;2) 对不同类别的材料,热扩散系数和热导率测量的测量结果,与使用稳态法测量值的符合程度却存在差别。文献[4]中曾经指出,对密度比较大,质地密实的材料,三种不同方法的测量符合得较好;而密度小,质地疏松的保温绝热材料,差别却比较大。例如,对聚氨脂硬泡沫塑料、聚苯乙烯硬泡沫塑料等,差别甚大,是不可忽略的。这是一个值得注意的问题。

经仔细分析,本文认为产生此种情况的根源,来自于式(7)。在式(7)中,用了同一时刻 t 热面和冷面的温度变化,这是不妥当的。因为热传导的速度是有限的, t 时刻热源处($x=0$)发出的热流,不可能瞬时到达冷面(试件中 x 处),而引起冷面的温度变化。或者说,使用式(7),意味着设定热传导的速度为无限大,这显然是不符合实际情况的。这就造成了用快速法测量与稳态法测量比较,对热的良导体,测量符合得较好;

对热的不良导体差别却甚大的根源。换言之,快速法仅仅适合于瞬态测定热的良导体的热物理性质;若要想用瞬态法测定热的不良导体的热物理性质,不能使用快速法测量。

2 脉冲法测量

脉冲法是上世纪80年代初发展起来的一种材料热物性瞬态测量方法。该测量方法可以避免使用式(7),而考虑到了热传导具有有限传播速度的特点。

2.1 脉冲法的测量原理

为求解式(1),类似地,亦可对偏微分方程作拉氏变换(边界条件不作变换),也可以解出:在 $x=0$ 处,零时刻附近热流强度 q 每作用单位时间,在 t 时刻于 x 处引起的温度改变量 $\frac{dJ(x,t)}{dt}$ 为

$$\frac{dJ(x,t)}{dt} = \frac{q}{2I} \sqrt{\frac{at}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \quad (9)$$

式(9)对时间的一次积分,即为在 $0 \sim t_1$ 这段加热时间内, t_1 时刻 x 处的温度改变量。即

$$J(x,t_1) = \int_0^{t_1} \frac{dJ(x,t)}{dt} dt = \frac{q}{I} \sqrt{\frac{at_1}{\pi}} B(y) \quad (10)$$

不难看出,这正是式(3)中的 a 、 $B(y)$ 亦即式(4)、(5)。应注意到,式(10)仅适用于 $t < t_1$ 的情况。若于 t_1 时刻断电,停止加热,边界条件将发生突变,尔后在 $x=0$ 处,热流强度 $q=0$ 。但热面温度仍然较高,冷面温度则较低。热量将继续沿原方向传播。即冷面继续升温,热面的温度则因传热而下降。根据托哈默尔定理,从开始加热起计时,到断电停止加热以后的某一时刻 t_2 ,试件内 x 处的温度变化为

$$J(x,t_2) = \int_0^{t_2} \frac{q}{2I} \sqrt{\frac{at}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4at}} dt - \int_0^{t_2-t_1} \frac{q}{2I} \sqrt{\frac{at}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4at}} dt \quad (11)$$

显然,式(11)只适用于 $t > t_1$ 的情形。于是,当 $t_2 > t_1$ 时,令 $x=0$,从式(11)可以计算出 $x=0$ 处,即热面的温度改变量为

$$J(0,t_2) = \frac{q}{I} \sqrt{\frac{a}{\pi}} (\sqrt{t_2} - \sqrt{t_2-t_1}) \quad (12)$$

用式(10)、(12),也能解出函数 $B(y)$ 来。即有

$$B(y) = \frac{J(x,t_1)}{J(0,t_2)} \frac{(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_2-t_1})}{\sqrt{t_1}} \quad (13)$$

在式(13)中,右端各量都可以在实验中测量得到。因此,也一定能计算出 $B(y)$ 的值。从而,也就可以从式(4)解出 y 值,用式(5)计算热扩散系数。而热导率则可用

$$I = \frac{q}{J(0,t_2)} \sqrt{\frac{a}{\pi}} (\sqrt{t_2} - \sqrt{t_2-t_1}) \quad (14)$$

计算得到。这就是脉冲法测量材料热物理性质的依据。显然,脉冲法是用停止加热后,热面因传热温度发生变化来计算材料的热物理性质的。考虑到了能量在材料中传递所用的时间。克服了快速法的不足。

2.2 脉冲法测量结果的分析

关于脉冲法测量材料的热物理性质,上世纪80年代就有研究和仪器面世。文献[5~8]等表明了这一点。但由于这些文献中,式(8)、(14)使用的单位混乱;在热流强度的计算式中又错误地引入了0.86的数值因子;加之当时采用电位差计测量温差电动势,一次只能测得一组数据,有较大的偶然性等原因,致使测量值没有什么可信度。在文献[9]中指出了这些问题。因此,至今我国已经几乎没有人使用脉冲法瞬态测量材料的热物理性质了。

3 材料热物性的瞬态自动测量

当修正了脉冲法测量原理中存在的那些不妥之后,将现代高度发展的信息技术,计算机技术等高新

技术引入材料热物性测量中来,改造传统的测量方法,发展了材料热物性瞬态自动测量技术。因此,可以说此项技术,是基于修正后的脉冲法瞬态测量材料热物理性质的原理发展起来的。据此,研制了新一代材料热物性瞬态自动测量仪。该测量仪的结构框图如图1所示。

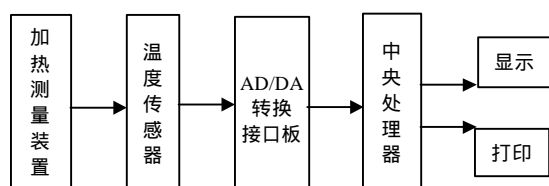


图1 材料热物性瞬态自动测量仪结构框图

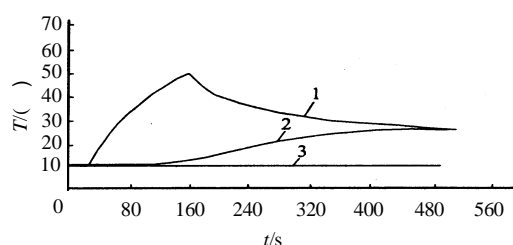


图2 $T-t$ 曲线

该测量仪的基本特点是用AD/DA转换接口技术加上计算机技术,淘汰了传统的用电位差计测量温差电动势的技术路线,实现了温度场变化数据采集的自动化。同时,还开发了TBS自动测量平台,以实现测温时刻及该时刻温度分布的实时数据采集、记录、列表、绘图等任务。同时,测量平台还有较强的数值计算和数据处理功能,能自动处理数据、生成测试报告及结果打印。从而实现了材料热物理性质的自动测量。

将这种测量技术及测量仪运用于实际测量,对用于绝热保温的聚氨脂硬泡沫塑料等多种热的不良导体进行了测量,其测量值与稳态法测量在测量误差范围内符合得很好,得到了满意的结果。图2给出了聚氨脂硬泡沫塑料板材实际测量的温度-时间曲线。图中:曲线1为热面的 $T(0,t) \sim t$ 曲线,曲线2为冷面的 $T(x,t) \sim t$ 曲线,曲线3为环境温度,在短暂的测量过程中,环境温度通常保持不变。

将图2中测得的聚氨脂硬泡沫塑料板材的 $J(x,t) \sim t$ 曲线的部分测量数值节录在表1中。表1中 $a = (4.45 \pm 0.01) \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = (3.36 \pm 0.01) \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^1 \cdot \text{K}^{-1}$,同时也给出了这种聚氨脂硬泡沫塑料板材的热扩散系数 a_i 和热导率 I_i 的计算值及A类不确定度的估计。计算用到的测量数据有: $m_0 = 0.01724 \text{ kg}$, $c_{p0} = 460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $R = 35.12 \text{ } \Omega$, $l_1 = 0.2010 \text{ m}$, $l_2 = 0.1990 \text{ m}$, $x = 0.02409 \text{ m}$, $I = 0.644 \text{ A}$, $t_0 = 28 \text{ s}$, $J(0,0) = 9.625 \text{ k}$, $J(0,x) = 9.75 \text{ k}$, $t_1 = 155 \text{ s}$, $J(x, t_1) = 1.75 \text{ k}$ 。

从表1中可以看出,测量各数据计算结果的重复性很好。热导率与稳态法的对比测量表明:相对误差约为2.4%,在仪器允许误差范围内,是符合得极好的。

表1 测量数据节录及数据处理

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_{2i}/s	191	194	197	200	203	206	209	212	215	218
$J(0, t_{2i})$	29.63	29.25	28.63	28.38	27.75	27.50	27.25	26.75	26.50	26.00
$B(y) \times 10^{-2}$	1.850	1.846	1.855	1.842	1.854	1.843	1.834	1.842	1.835	1.845
y^2	2.097	2.105	2.105	2.101	2.105	2.101	2.113	2.109	2.109	2.105
$a_i / \text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 10^{-7}$	4.45	4.45	4.46	4.44	4.45	4.44	4.45	4.44	4.44	4.45
$\Delta a_i / \text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 10^{-7}$	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
$I_i / \frac{\text{W}}{\text{mk}} \times 10^{-2}$	3.37	3.36	3.37	3.35	3.37	3.35	3.33	3.35	3.34	3.36
$\Delta I_i / \frac{\text{W}}{\text{mk}} \times 10^{-2}$	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00

4 结束语

综上所述,快速法可以用于热的良导体热物性的测量,不宜用于测量热的不良导材料的热物理性质;原有的脉冲法则问题较多,只有改正原有测量理论中的错误,并用现代技术进行改造后,才有可能用于实际测量。我们研究材料热物性瞬态自动测量方法,可以准确、快速测量材料的热物理性质,值得深入研究发展,新近研制的SHT-20材料热物性自动测量仪,有望成为新一代材料热物性测量的主导仪器。

(下转第593页)

4 结 束 语

利用本文算法解决了高阶非线性控制系统的作图,所有的过程均无需求解微分方程,具有一定的实用价值。但非线性系统阶次越高,作图的中间步骤就越多,对于三阶、四阶或五阶系统其作图步骤适中,并能取得良好的作图效果,从而实现不解高阶微分方程而直接画出相平面的目的。为提高制图精度和制图速度,步距 h 的选择可采用变步距的方法,越接近稳定或变化幅度越小时,步距选择越小。同时也提供了一种求解高阶非线性微分方程的方法。

参 考 文 献

- [1] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 357-356
- [2] Vidyasagar M. Nonlinear systems analysis[M]. New York : Prentice-Hall, Inc, 1978. 230-234
- [3] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 144-150

编 辑 漆 蓉

(上接第554页)

参 考 文 献

- [1] 陈昭栋, 舒维芬. 恒流法测定热扩散系数. 物理实验[J]. 2000, 20(1): 10-12
- [2] 施明恒. 热工实验的原理和技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 1992. 144-146
- [3] 陈昭栋, 舒维芬. 热导率瞬态测量的数据处理[J]. 物理实验, 2000, 20(3): 6-8
- [4] 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[J]. 物理实验, 2002, 22(10): 3-5
- [5] 沈韫元. 建筑材料热物理性能[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. 33-46
- [6] JC275-80[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980
- [7] 纪午生. 常用建筑材料试验手册[Z]. 北京: 中国建筑出版社, 1986, 357-358
- [8] 工程建设规范汇编21. 建筑材料技术规程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987. 115
- [9] 陈昭栋, 舒维芬. 热导率的非稳态测量方法及常数修正[J]. 工科物理, 1993(3): 31-33

编 辑 孙晓丹

(上接第572页)

参 考 文 献

- [1] 吴永辉, 周傲英. 规范化对象模式森林—复杂对象模式的范式[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [2] 刘义英. 关系数据模型转换为对象数据模型的研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2001, 20 (4):300-308
- [3] Bertino E, Martino L. Object-Oriented database management systems[J]. concepts and issues, IEEE Computer, 1991, 24(4) :9-18
- [4] 张家明. 关系数据库模式向对象数据库模式的转换[J]. 东南大学学报, 1998, 21(4):70-74
- [5] 谷长勇, 徐志伟, 诸兴国. XML结构和关系数据库的一种形式化映射[J]. 计算机工程, 2001, 20(2): 11-27
- [6] 陈文字. 利用数据库处理多个对象间的关系[J]. 电子科技大学学报. 2002, 31(3): 270-274

编 辑 徐安玉