

# 一种全自动的准稳态法导热系数测量装置

Fully Automated Measuring Apparatus of Thermal Conductivity  
by using Quasi-steady State Method

吴江涛 潘江 张可 刘志刚

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室 西安 710049)

**摘要** 在对准稳态法测量导热系数原理分析的基础上,研制了一套用准稳态法测量导热系数的实验装置,克服了以往准稳态法导热系数测量装置中存在的一些不足,同时开发了运行于 Windows 环境下的全自动测量软件。最后利用已知热物性数据的标准试样有机玻璃对装置进行了检验。实验结果表明,所研制的实验装置能够准确地测得一定范围内固体试样的导热系数,并可满足实际工程导热系数测量的需要。

**关键词** 准稳态法 导热系数 自动化测量

**Abstract** On the basis of analysis of the principle of the quasi-steady state technique to measure the thermal conductivity, a fully automated apparatus to measure the thermal conductivity was developed. Many disadvantages in previous apparatus had been overcome. In addition, automatic measurement software running in Windows environment was developed. Finally, the apparatus was tested with a calibrated sample of which the thermal property data are known. The experimental results indicated that the apparatus is able to measure thermal conductivity of solid samples precisely in certain range and meet the requirements in engineering application.

**Keywords** Quasi-steady state method Thermal conductivity Automated measurement

## 0 引言

导热系数作为物质的重要物理参数,在化工、能源、动力工程等领域有着重要的用途,是许多工业流程和产品设计中必不可少的基础数据。物质的导热系数可以通过实验测量、理论推算或计算机模拟等方法来获得,但目前仍然以实验测量为主。根据导热系数的实验测量原理<sup>[1,2]</sup>,其测量方法大致可以分为稳态法和非稳态法。其中,非稳态法<sup>[3]</sup>由于测量时间短、测量精度可以与稳态法相当,近年来得到了快速发展。目前,用于导热系数测量的非稳态法有很多种,如瞬态热丝法、探针法和平板准稳态法等。本文所介绍的是为实际工程应用开发的一种全自动的准稳态法导热系数测量装置。

## 1 准稳态法测量原理

在介绍准稳态法测量导热系数原理之前,首先对用该方法测量导热系数时加热过程中无限大平板温度的变化过程进行分析。图1给出了平板温度变化过程的简化模型,取试样底面为  $x$  轴的起点,热流方向与  $x$  轴的正向相同,平板受热流密度( $q$ )恒定的热流均匀加热,试样的顶部为绝热面, $T$  表示试样中位置为  $x$  的某点处、时间为  $\tau$  时的温度,试样的初始温度为  $T_0$ 。

根据传热学<sup>[2,4]</sup>可知,模型数学描述式为

$$\frac{\partial T_{(x,\tau)}}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T_{(x,\tau)}}{\partial x^2} \quad (0 < x < l) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_{(0,\tau)}}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_{(l,\tau)}}{\partial x} = \frac{Q}{\lambda} \quad (3)$$

$$T_{(x,0)} = T_0 \quad (4)$$

式中: $\tau$  为时间(s); $Q$  为从底面向试样加热的恒定功率(W); $\alpha$  为试样的热扩散率( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $\lambda$  为试样的导热系数( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ); $A$  为试样面积( $\text{m}^2$ ); $l$  为试样厚度(m)。通过计算可以得到此模型的解为

$$T_{(x,\tau)} - T_0 = \frac{Ql}{\lambda A} \left( \frac{\alpha\tau}{l^2} + \frac{x^2}{2l^2} - \frac{1}{6} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2\pi^2} \exp(-n^2\pi^2 F_0) \times \cos n\pi \frac{x}{l} \right) \quad (5)$$

式中, $F_0$  为傅立叶数, $n=1, 2, 3, \dots$

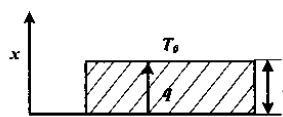


图1 平板加热过程

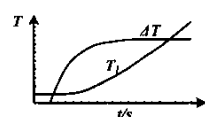


图2 准稳态法测试曲线

为了使该模型能够在实际中得到应用,必须进一步简化上述模型与方程的解。由

$$F_0 = \frac{\alpha\tau}{l^2} \quad (6)$$

可知,随着时间  $\tau$  的延长,式(5)中的级数和变小。当  $F_0 > 0.5$  时,解的级数和变得很小,可以忽略不计,所以式(5)可简化为

$$T_{(x,\tau)} - T_0 = \frac{Ql}{\lambda A} \left( \frac{\alpha\tau}{l^2} + \frac{x^2}{2l^2} - \frac{1}{6} \right) \quad (7)$$

由此可见,当  $F_0 > 0.5$  时,平板各处的温度与时间呈线性关系,平板温度随时间变化的速率是常数,并且各处相同,这种状态称为准稳态。式(7)表示了准稳态过程中试样的温度分布情况。

平板导热过程准稳态阶段的形成过程如图 2 所示。即加热一段时间后,试样加热底面的温度  $T_1$  进入等速升温直线段,随后试样上下底面的温度差  $\Delta T$  达到稳定的最大值  $\Delta T_{max}$ ,此即为系统的准稳态。因此,在实际测量时,可以通过数学变换,由式(7)直接得到试样导热系数的计算公式

$$\lambda = \frac{Ql}{2A\Delta T_{max}} = \frac{2Ql}{\pi D^2 \Delta T_{max}} \quad (8)$$

在理想情况下,这种动态稳定状态可以一直保持。而实际上,由于温度随时间升高、绝热层漏热及四周散热逐渐显著而使试样两端温度差  $\Delta T$  发生变化,系统脱离准稳态。由于无限大平板只是理论上的假设,而实际试样的尺寸总是有限的,因此,在实验中,往往通过测量试样两端面中心处的温差来得到理论上无限大平板时两端的温差。实验证明,当试样的横向尺寸为厚度的 6 倍以上时,两端散热对试样中心温度的影响已在工程误差允许的范围之内,可以忽略不计。由式(8)可知,只要测得试样的厚度、直径、加热功率和进入准稳态后上下底面的温差,即可求得待测试样的导热系数。

## 2 实验系统

在以往所报道的准稳态法导热系数测量装置中存在有不少需要改进的地方<sup>[5~9]</sup>。如温度差大多由热电偶分别测量冷、热表面的温度后计算得到,加热用的电源电压需要通过二次仪表测量得到,甚至采用交流电源,难以保持加热功率的稳定,热电偶的电势差通常由人工利用电位差计来读取数据,精度较差而且不能实现自动化,试样大多采用方形等。为克服上述不足,根据前面所述的准稳态导热系数测量原理,设计了如图 3 所示的实验系统,它主要包括试样装置、温度测量系统和数据采集与处理系统等。

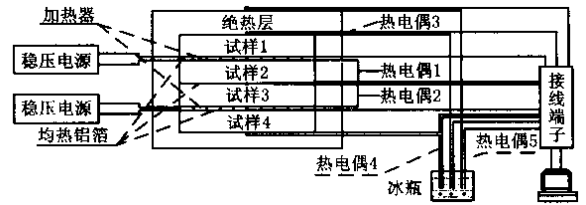


图 3 实验系统示意图

试样装置用来安装试样、加热装置和热电偶,并尽量减小被测试样与外界的换热。试样装置包括待测试样、稳压电源、加热器、均热用铝箔和绝热层等。试样为 4 块尺寸完全相同的圆饼,直径 100mm,厚度 8mm;试样表面要求平整、干净,使接触良好。与方形试样相比,圆形试样能形成更均匀的温度场,在本设计的实验装置中,试样的直径和厚度可以适当变化。采用数字式直流稳压电源,通过恒流恒压的方式保证加热器功率的稳定和均匀,而且可以直接显示电流和电压值,从而避免二次仪表测量加热功率带来的麻烦和误差。加热器采用中国空间技术研究院的 125 型薄膜电加热器。加热面积和试样相同。加热器两侧以及试样 2 和试样 3 之间放置与试样直径相同的均热铝箔,由于铝的导热系数很大,可使得通过试样的热流均匀和稳定。为减少实验过程中因传热带来的测量误差,采用硬质聚氨酯发泡为绝热层材料。

温度测量系统用来测量热电偶的电势差并将其传送到数据采集与处理系统。该系统由温度采集卡(包括接线端子)、热电偶和冰瓶等组成。通过分析比较,最终认为 NI 公司生产的 PCI-4351 高精度温度采集卡可以满足要求,其电势测量的最大相对误差仅为 0.0205%;另外也可采用精度更高的六位半数字万用表(如 Keithley2700 等),但价格相对偏贵。热电偶采用直径为 0.2mm 的铜-康铜热电偶。实验中,本装置使用热电偶直接测量上下两表面温差,减小了测量误差。实验系统中,数据采集与处理系统是实现导热系数测量自动化的关键,计算机接收采集到的电势差值后由热电偶的温度-电势关系式计算出试样两端的温度,并由式(8)计算出被测试样的导热系数值。

该系统由计算机硬件和软件组成。系统采用一台 PIII 工控机,通过 PCI 总线与数据采集卡连接。数据测量与处理软件(如图 4 所示)是采用 Microsoft Visual C++ 6.0、MFC 类库和多线程技术开发的,可以运行于 Windows 环境。热电偶的温度-电势关系式中的系数、数据通过软件安装目录中的 data.inf 文件按顺序输入。试样的直径、厚度、加热功率等参数可以通过软件的对话框输入。

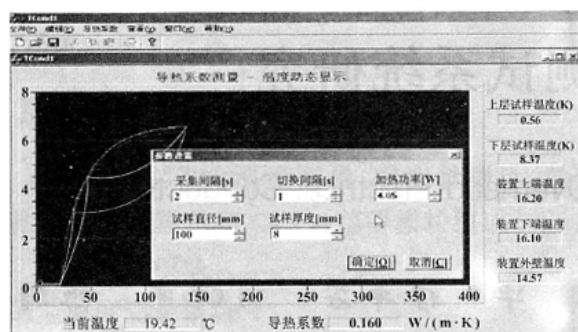


图4 自动化软件截图

在完成装置的安装后,待测试样导热系数的测量全部由计算机自动控制实现,测量得到的导热系数直接显示在计算机界面上。可以通过动态显示上下层试样温度变化情况确定导热系数测量的开始和停止。

### 3 误差分析和装置校核

由计算公式(8)可知,导热系数的相对误差为

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 + \left(2\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\max}}\right)^2} \quad (9)$$

另外,由实验系统采用的仪器、设备和元件等带来的误差,如加热器由 CHAMPWAY MODEL GPS3015H 数字式直流稳压电源供电,最大的加热功率为 20W(针对本文采用的加热器)精度  $\delta Q$  为 0.01W;试样厚度  $l$  和直径  $D$  由游标卡尺测得, $\delta l$  和  $\delta D$  均为 0.02mm;试样两端温度差稳定后的值  $\Delta T_{\max}$  的测量精度为 0.1℃,主要取决于热电偶和数据采集卡。于是根据式(8)和(9)可以得到,在导热系数  $\lambda$  小于 5W/(m·k)时,本实验装置测量精度高于 5.0%,其中主要的误差来源于热电偶的测温误差,但就目前的条件而言,已经不可能明显提高热电偶的测温精度了。

为检验本实验装置的可靠性,用本实验装置对有机玻璃试样的导热系数进行了测量,实验数据如表 1 所示。实验中采用的有机玻璃密度为 1181kg/m<sup>3</sup>,加热

表 1 有机玻璃导热系数的实验测量结果

序号	开始温度 ℃	结束温度 ℃	平均温度 ℃	导热系数 Wm <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
1	13.08	19.42	16.25	0.160
2	19.20	24.91	22.06	0.158
3	18.18	25.15	21.67	0.159
4	17.12	22.93	20.03	0.159
5	23.67	30.3	26.99	0.160
6	10.37	17.04	13.71	0.162
7	18.62	24.19	21.41	0.159
8	14.50	20.27	17.39	0.160
9	19.47	35.04	27.26	0.157
10	11.05	17.76	14.41	0.162

源功率为 4.05W。

由表 1 所列的实验数据可以看出,本装置测量结果具有良好的复现性,表明本实验装置所测得的结果具有可信性。另外,从文献[11]得到的有机玻璃的导热系数为:密度  $\rho = 1180 \sim 1190\text{kg/m}^3$ ,导热系数  $\lambda = 0.12 \sim 0.17\text{kcal}(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ ,可见导热系数自动测量装置可以满足工程应用需要。

### 4 结束语

研制的准稳态法测量导热系数的实验装置克服了以往平板准稳态法导热系数测量装置中存在的一些不足,同时开发了运行于 Windows 环境下的全自动测量软件。利用已知热物性数据的标准试样有机玻璃对装置进行了校核,实验结果表明,在待测导热系数小于 5.0W/m·k 时,精度高于 5.0%。本实验装置能够准确地获得有关试样的导热系数,可满足实际工程导热系数测量的需要。

#### 参考文献

- Wakeham W A, Nagashima A, Sengers J V. Experimental Thermodynamics Vol. III: Measurement of the Transport Properties of Fluids, Blackwell Scientific Publications, 1991.
- 陈则韶,葛新石,顾毓新.量热技术和热物性测定[M].中国科学技术大学出版社,1990
- Hammerschmidt U. A Quasi-Steady State Technique to Measure the Thermal Conductivity [J]. International Journal of Thermophysics, 2003, 24(5)
- 杨世铭,陶文铨.传热学.高等教育出版社,1998
- 石磊,樊栓狮,郭开华.储能材料导热性能研究[J].太阳能学报,2002,23(4)
- 吕昶,郭廷玮,朱庭英,郭开华.高分子聚合材料的导热系数测定.制冷学报,2000(3)
- 沈雅钧,金剑雄,沈晓群.绝热保温材料热物性的准稳态法测试.浙江海洋学院学报,2001,20(1)
- 张辉,陈友昌.新疆沙漠沙有效导热系数的测定[J].东南大学学报,2002,32(2)
- 卢建航,孙宏,尹海山.用准稳态法测定橡胶及橡胶基复合材料的导热系数和比热容[J].轮胎工业,2001,21(5)
- 国家技术监督局.中华人民共和国国家计量校核规范汇编 热电偶[M].中国计量出版社,2000
- 马庆芳,方荣生,项立成,郭舜.实用热物理性质手册[M].中国农业机械出版社,1986

国家自然科学基金资助项目(编号 50306021),国家重点基础研究发展规划资助项目(编号 2001CB209208)。

修改稿收到日期 2004-09-02。

第一作者吴江涛,男,1973年生,2002年获西安交通大学工程热物理专业博士学位,副教授,研究领域为流体热物性的自动化测量以及分子模拟。