

非稳态法与准稳态法测量热系数*

徐 宜 发

(航天工业总公司31所, 北京, 100074)

摘要: 从理论和实验分析了平面热源非稳态法和准稳态法测量热导率及比热容等热系数的问题。并从主测量设备到测试、计算方法提出改进, 以简化测试计算, 提高测试精度。此外, 还比较了两种方法的优缺点, 明确了各自应用的条件和范围。

主题词: 热物理性质, 测试设备, 计算方法

分类号: V231.13

THE MEASUREMENT OF THERMAL COEFFICIENTS BY NONSTABLE STATE METHOD AND QUASI-STABLE STATE METHOD

Xu Yifa

(The 31st Research Institute, Beijing, 100074)

Abstract: In this paper, it is discussed to determine the thermal coefficients, such as thermal conductivity, specific thermal capacity and so on, by nonstable state method and quasi-stable state method in plane heat source. In order to simplify the calculation and to improve the accuracy, it is proposed to improve the main instruments and the method for measurement and calculation. In addition, the merits and defects of two methods are compared. Their respective appropriate measure conditions and ranges are also proposed.

Keywords: Test set, Calculation method, Themophysical property

1 前 言

固体传热过程的热系数包括热导率 λ , 比热容 c , 热扩散系数 α 等参数。涉及建筑、冶金、

* 本文1992年12月28日收到

化工、制冷、航空航天等领域均需对热系数准确测定。

目前国内各种热导率和比热容的测量方法及采用的标准很多，一般用稳态法或热线法测量热导率；用量热计法测量比热容。热线法简便但测量误差大；稳态法和量热计法精度高，但仪器复杂价高，而且测试要求高、时间长。

采用平面热源准稳态法^[1]及非稳态法^[2]可同时快速测量各热系数参数。但是，原标准和仪器都存在主测量设备选用不当，用单通道不贮存数据的仪器去测量双路动态参数，使操作或计算方法复杂化，使用和普及都很困难。

本文分析上述两种方法的原理，提出改进主测量设备，简化操作计算方法，明确各自应用的条件、范围，比较两种方法的优缺点，为今后测试设备微机化打下基础。

2 准稳态法

2.1 测试原理

准稳态为一种动态稳定状态。这是指平板试样一面受恒定热流密度加热，另一面在绝热的情况下，经初始热传导后，出现试样各处都以同一速率升温，热流方向任意两点温差恒定的状态。

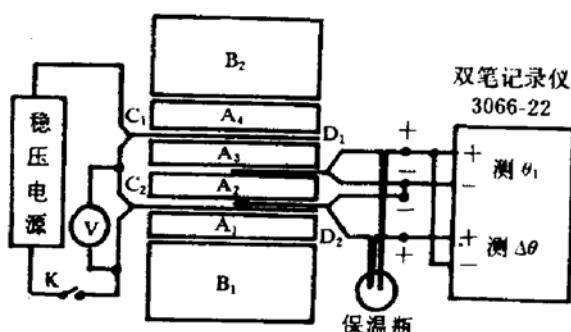
图1给出改进后的测定装置及电路图。测定装置由相同的四块试样、两个平面加热器、两块绝热层组成对称结构。其中 A_2 （也可以是 A_3 ）为主测量试样，其余为辅助测试件。采用对称结构装置的目的：一是使每块试样得到的热流密度相等；二是在对称中心形成动态理想绝热面，也减少 θ_1 测量受试样间隙的影响。

在主测量试样两端面中心各放一支相同材料的热电偶，两支热电偶反向串联以测试样的温差；再用对称中心热电偶测试样温升速率。

2.2 测试计算方法

主测量设备原标准采用 UJ-31 电位差计或数字电压表，现改用 3066-22 双笔高精度记录仪（四川仪表四厂生产），其最灵敏档精度达 $0.31 \mu\text{V}$ ，高于原标准，直接采用可提高精度，扩大测试范围。

记录仪由于操作简便，可多笔实录动态过程，走纸方向包含了时间坐标等优点，试验时将使操作者从过去紧张的操作中完全解脱。通电加热后，只需观察记录曲线，确认系统进入准稳态后即可适时关机结束试验。



A 试样 B 绝热层 C 平面加热器 D 热电偶
图1 准稳态法的测定装置及电路

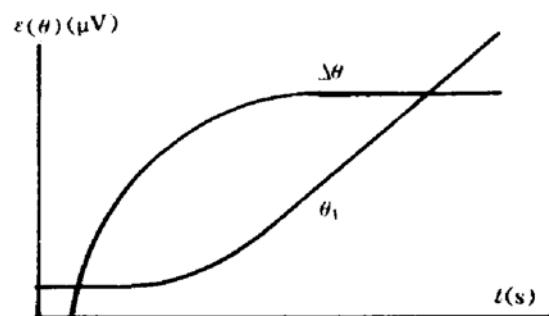


图2 准稳态法的测试曲线

图2表明了准稳态形成过程，加热一段时间后， θ_1 首先进入等速升温直线段；随后 $\Delta\theta$ 进入稳定最大值，此即为系统准稳态。理想情况下，这种动态稳定状态可以一直保持。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，将使 $\Delta\theta$ 减小，系统脱离准稳态。

热导率 λ 和比热容 c 的计算仍按原标准：

$$\lambda = \frac{ql}{2.04\Delta\theta} \quad (1)$$

$$c = \frac{q}{1.02\rho l \frac{\Delta\theta_1}{\Delta t}} \quad (2)$$

式中 ρ, l 分别为试样的密度和厚度； $\Delta\theta$ 为所测曲线中达到稳定的最大温差； $\frac{\Delta\theta_1}{\Delta t}$ 为 θ_1 直线段斜率。当走纸速度校测后，横坐标即为时间坐标，可用直尺延伸 θ_1 的直线段，以扩大 $\Delta\theta_1$ 、 Δt 的量程，提高计测精度，缩短试验时间。 q 为平面加热器向主测试样（也是每块试样）提供的热流密度，可按（3）式计算：

$$q = \frac{P}{2F} \quad (3)$$

式中 F, P 分别为一块加热器的加热面积和加热功率。

2.3 参数选择与应用范围

将（3）式代进（1）式可得

$$\lambda = \left(\frac{l}{4.08F} \right) \frac{P}{\Delta\theta} \quad (4)$$

当试样和加热器确定后， λ 和 L, F 值为常数。由加热功率 P 唯一确定 $\Delta\theta$ 值；反之，由预估的 $\Delta\theta, \lambda$ 值也可计算试验功率值。可以把 $\Delta\theta$ 值作为选择加热功率、控制测量精度的依据。

图3试验数据给出加热功率对 $\lambda, c, \Delta\theta$ 测试的影响。结果表明，准稳态法可在较宽的功率范围测试。低功率对比热容测试影响大，对热导率影响小；高功率则影响相反。其原因是低功率时主要是冷端温度飘移对 θ_1 斜率影响大，其次要考虑测量精度；高功率时主要影响因素是高温引起的漏热、散热。由此，测热导率可在 $\Delta\theta=1\sim4^\circ\text{C}$ 、测比热容 $\Delta\theta=2\sim5^\circ\text{C}$ 确定加热功率。综合两者 $\Delta\theta=2\sim4^\circ\text{C}$ 。一般加热测试时间5~10min。

图4给出（4）式计算的准稳态法功率选择与测量范围关系。由图可见，其测量上限约为5W/m·K；下限由绝热层的热导率决定，即满足 $\lambda_{\text{下}} \geq 3.5\lambda_{\text{上}}$ ，如采用聚氨脂泡沫塑料 ($\lambda \leq 0.027\text{W/m}\cdot\text{K}$)，下限为0.1W/m·K。

3 非稳态法

国产 DRM-1型导热系数测定仪提供了一个非稳态测量热系数的方法。该仪器已在建筑行业广泛采用。本文将对其作如下改进：

（1）用双笔高精度记录仪作主测量设备。

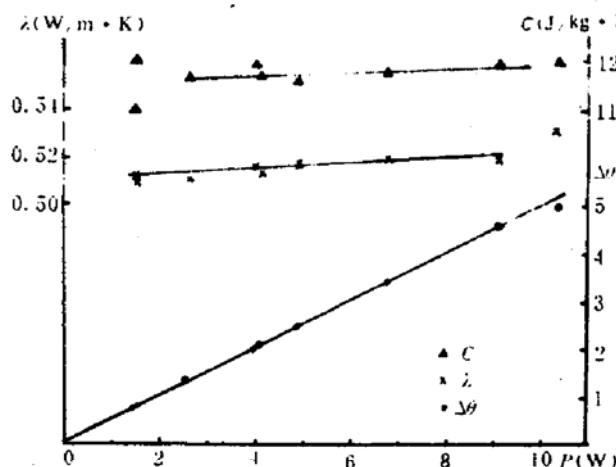


图3 加热功率对 λ 、 c 、 $\Delta\theta$ 测试影响
试样：复合固体推进剂 TJ-3102

(2) 改用航天部标的 100×100 小型平面加热器，试样相应改小为：一块薄试样 $100 \times 100 \times l$ ；两块厚试样 $100 \times 100 \times 4l$ 。 l 在 $10 \sim 15$ mm 范围选取。

(3) 改进试验采集数据方法和计算方法，明确参数选择与应用范围。

3.1 测量原理

图5给出改进后的非稳态法测定装置及电路图。测定装置由一块薄试样，两块厚试样，一个平面加热器，两个相同材料的热电偶组成。两个热电偶分别测量薄试样两端面中心的温度变化。

采用半无限大平板非稳态传热原理。平面加热器在试样内加热后，热流沿厚度方向上下传播，在传出试样上下端面之前，测量薄试样两端面某一时刻 t 的温度升高 $d\theta_1$ 、 $d\theta_2$ ，即可计算 λ 、 α 、 c 值。

3.2 测量计算方法

不同的试验数据采集方法可导出不同的计算式（参见表1）。

(1) 热脉冲法：由原设备提出采用短时间 t_1 加热至 $d\theta_1$ 升高约 2°C 时停止加热，测出相应 t_1 时的 θ_1 值，然后再测出 t_2 时的 θ_2 值。

(2) 常功率热源法：由天津大学热物理工程系提出，即在加热过程中先后测出 t_2 、 θ_2 ； t_1 、 θ_1 值。

(3) 同时取数据法：前两种方法都采用单通道电位差计，在不能同时采集两个数据的情况下提出的。本文由于采用双笔记录仪，可采集同一时刻 t 的 θ_1 、 θ_2 值，由此不仅使计算式变得简洁，而且 $B(y)$ 和 λ 计算式消除了时间参数，可减少测试误差，提高测试精度。

三种计算方法理论上一致，后者可从前两种计算式令 $t_1=t_2=t$ 直接得到，也可从导热微分方程推导得出^[3]。

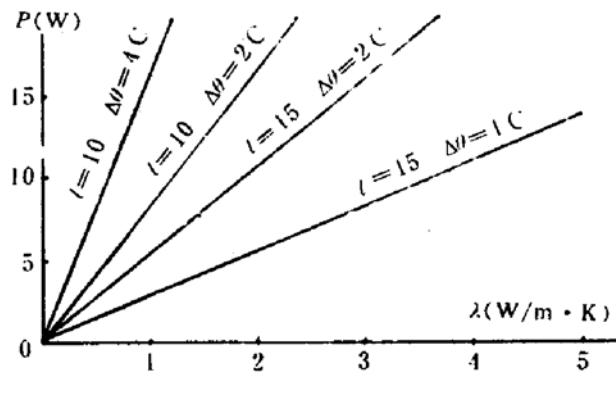
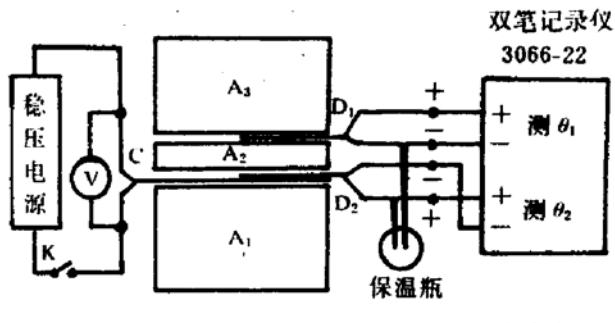


图4 准稳态法的功率选择与测量范围



A 试样 C 平面加热器 D 热电偶
图5 非稳态法的测定装置及电路

表1 非稳态法三种取数据方法及计算式

	热脉冲法	常功率热源法	同时取数据法
数据采样示意			
温度函数	$B(y) = \frac{d\theta_1(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_2 - t_1})}{d\theta_2 \sqrt{t_1}}$	$B(y) = \frac{d\theta_1 \sqrt{t_2}}{d\theta_2 \sqrt{t_1}}$	$B(y) = \frac{d\theta_1}{d\theta_2}$
热扩散系数	$\alpha = \frac{l^2}{4y^2 t_1}$		$\alpha = \frac{l^2}{4y^2 t}$
热导率	$\lambda = \frac{q \sqrt{\alpha} (\sqrt{t_2} - \sqrt{t_2 - t_1})}{\sqrt{\pi} d\theta_2}$	$\lambda = \frac{q \sqrt{\alpha t_2}}{\sqrt{\pi} d\theta_2}$	$\lambda = \frac{q l}{2 \sqrt{\pi} y d\theta_2}$
比热容	$c = \frac{\lambda}{\alpha \rho}$		

表1中各参数的意义： y 为函数 $B(y)$ 的自变量； $B(y)$ 为非稳态温度随时间变化的函数*。文献 [2] 提供了一个 $B(y) - y^2$ 数值表，从测量值计算出 $B(y)$ 值即可查出相应的 y^2 值，从而计算出 α 、 λ 、 c 值。其它参数： t_1 、 t_2 分别为从开始加热至采集 θ_1 、 θ_2 的时间， t 则为 θ_1 、 θ_2 同时采样的时间， $d\theta_1 = \theta_1 - \theta_{10}$ 、 $d\theta_2 = \theta_2 - \theta_{20}$ 为经 t 时刻（或相应 t_1 、 t_2 时刻）薄试样上、下表面温度升高； α 为热扩散系数； q 为加至整个试样的热流密度。注意，此处的定义和计算式与 (3) 式有差别：

$$q = \frac{P}{F} \quad (5)$$

3.3 参数选择与应用范围

非稳态法各参数影响较隐蔽。采用准稳态分析方法，将 (5) 式代进同时取数据法的热导率计算式可得

$$\lambda = \left(\frac{l}{2 \sqrt{\pi} F} \right) \frac{P}{y d\theta_2} \quad (6)$$

(6) 式与 (4) 式具有异曲同工之妙，系数差别不大，由 $y d\theta_2$ 代替了 $\Delta\theta$ ，可以参照图 4 确定非

* 导热微分方程推导中， y 及 $B(y)$ 定义为

$$y = \frac{l}{2 \sqrt{\alpha t}}$$

$$B(y) = \sqrt{\pi} ierfc(y) = e^{-y^2} - \sqrt{\pi} y [1 - erf(y)]$$

式中 $erf(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-x^2} dx$ 称为高斯误差函数（又称几率积分）。 $ierfc(y)$ 则称为高斯误差补函数一次积分。文献 [3,

4] 可查到这两种函数与变量 y 的数值表。据此可计算 y （或 y^2 ）～ $B(y)$ 数值表。

稳态法的功率选择和应用范围。 $y\Delta\theta_2$ 允许有更宽的范围，一般 $y\Delta\theta_2=1\sim10^\circ\text{C}$ 或更宽一些，但是它只作功率选择的参考，控制测试精度还应满足：

(1) $\Delta\theta_1$ 的温升达到 $1\sim2^\circ\text{C}$; $\Delta\theta_2 < 10^\circ\text{C}$, 以满足温度测试精度要求。

(2) 加热测试时间控制在 6min 内，以满足热流不传出试样边界，下限要满足时间测试精度。

非稳态法无测量下限；上限与准稳态法类似。

4 准稳态法与非稳态法比较

准稳态法适用范围 $0.1\sim5\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。具有测试参数稳定，精度较高，计算简便，试样体积较小 ($0.4\sim0.6\text{dm}^3$) 等优点；缺点是存在测量下限。

非稳态法适用范围 $0\sim5\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。具有测试时间短，无测量下限，适于各种绝热材料测量。本文作较大改进后，测算方法较以前简便，但仍需查表计算。

表2列出不同材料用不同方法测试结果的比较。由表可见：准稳态法与非稳态法测量热导率符合性良好，比热容偏差 $2\sim5\%$ 。

表2 不同材料用不同方法测试结果比较

	复合固体推进剂				有机玻璃			
	λ	c	n	$C_v\%$	λ	c	n	$C_v\%$
准稳态法	0.517	1188	13	1.8	0.175	1479	5	2.0
非稳态法	0.517	1123	9	2.5	0.173	1445	2	
热线法	0.523		4	4.2				

表中 λ , $\text{W/m}\cdot\text{K}$; c , $\text{J/kg}\cdot\text{K}$; n 为子样数; C_v , 变异系数, 有两个值时, 取其大者。

5 结 论

平面热源的非稳态法和准稳态法可简便快速测量各热系数参数。两种方法原理不同，测试方法和测量上限类似，优缺点互补，可兼容于同一设备，用于各种非金属固体均质材料热系数测量。

主测量设备改用高精度记录仪不仅大大简化了操作和计算方法，而且提高了测量精度，扩大了测试范围。本文从理论和试验明确了两种方法的参数选择、精度控制条件和应用范围。两种方法的误差均不大于 5% ，适于普及应用。

参 考 文 献

- [1] QJ 809-83. 固体推进剂和固体发动机绝热层热导率的测定方法. 航天部部颁标准
- [2] 天津建筑仪器厂. DRM-1型导热系数测定仪使用说明书. 1977
- [3] 雷柯夫 A. B. 热传导理论. 北京: 高等教育出版社, 1955
- [4] 徐桂芳编译. 积分表. 北京: 科学技术出版社, 1956