

# 准稳态法测不良导体的导热系数和比热

热传导、对流和热辐射是热量传递的三种基本方式。而在热传导中，导热系数和比热是材料物性的重要参数，它们的测定对于建筑、航天、航空、化工、热工等领域的工程设计都具有重要意义。本实验采用的准稳态测量方法主要用于不良导体导热系数与比热的测量，相对于一般的稳态测量方法，其优点在于测量时间短，重复性、稳定性好，结果较准确。

## 一、实验目的

1. 了解准稳态法测量不良导体的导热系数和比热原理，并通过测量学习掌握该方法。
2. 掌握使用热电偶测量温度的方法。

## 二、实验原理

### 1. 热传导

物体相邻部分间存在温度差，在各部分之间不发生相对位移的前提下，仅依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为热传导（导热）。考查如图 1 所示的两个表面均维持均匀恒温的平板的一维稳态导热问题，对于  $x$  方向任意厚度为  $dx$  的微元层来说，根据傅里叶定律，单位时间内通过该层的导热热量  $I_Q$  与该处的温度变化率  $dT/dx$  及平板面积  $S$  成正比

$$I_Q = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

式中，比例系数  $\lambda$  即为材料的导热系数（热导率），负号表明热流方向与温度梯度  $dt/dx$  方向相反。

定义单位时间内通过单位面积的热流量称为热流密度，记为  $J_Q$ ，图 1 情况则有

$$J_Q = \frac{I_Q}{S} \quad (2)$$

式 (1) 可写为

$$J_Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

(3) 式就是宏观热传导规律-傅里叶定律。由此可知导热系数的物理意义是，在单位温度梯度影响下物体产生的热流密度，单位为  $W/(m \cdot K)$ 。材料的导热系数会随温度变化，除铝、水等少数物质外大部分固体、液体材料的导热系数随温度升高而下降，气体的导热系数随温度升高而升高。

### 2. 一维(固体)热传导方程及方程解

推导过程，去掉热流密度的下标。如图 2，时间变量为  $t$ ， $d\tau$  时间内闭合曲面内(对应微小体积  $dV=Sdx$ )增加的热量(内能)：

$$dQ = J(x)Sdt - J(x+dx)Sdt = -\left(\frac{\partial J}{\partial x} dx\right)Sdt \quad (4)$$

$$\text{由(3)式得: } \frac{\partial J}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5)$$

$dQ$  使  $dV$  内升温  $dT$ ，设材料的比热为  $c$ ，密度为  $\rho$ ，有方程

$$dQ = \rho S dx c dT \quad (6)$$

(5) 式和 (6) 式代入 (4) 式，整理得一维(固体)热传导方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

本实验采用较简单的一维无限大平板导热模型进行  $\lambda$  的测量。如图 3 所示，假设有厚度为  $2L$  的无限大平板，原始温度为  $T_0$ ，从平板的两端面以功率相同、能产生均匀热流的加热器加热，表面热流密度的大小恒定为  $J_c$ ，显然板内温度分布必以中心截面为对称面。对应于图 3 所示的一维热传导情形，建立图示坐标系，取  $0 < x < L$ ， $t > 0$ 。

设初始条件

$$T(x, t)_{t=0} = T_0 \quad (8)$$

有边界条件

$$J_c = \lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad (9)$$

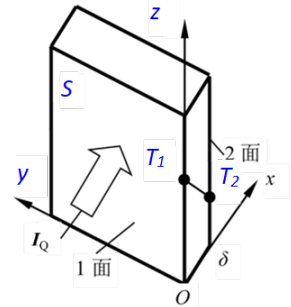


图1 通过平板的一维导热

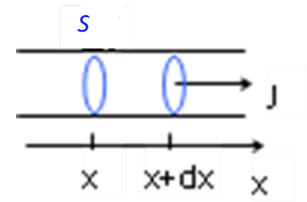


图2 一维热传导

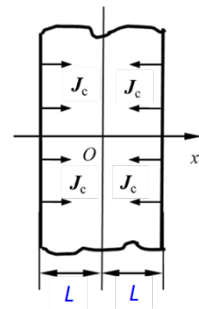


图3 无限大平板一维导热模型

$$\left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (10)$$

其中式(9)限定加热器在样品表面产生的热流密度不随时间改变, 式(10)限定平板的中心面处两加热器产生的热流密度大小相等, 方向相反, 中心面为绝热面。

引入辅助变量  $k=\lambda/(c\rho)$ , 比热  $c$  的单位:  $J/(kg \cdot K)$ , 密度  $\rho$  的单位:  $kg/m^3$ , 导热系数  $\lambda$  的单位:  $W/(m \cdot K)$  利用分离变量法可以解出方程(7)的解为:

$$T(x,t) - T_0 = \frac{J_c}{\lambda} \left[ \frac{kt}{L} - \frac{L^2 - 3x^2}{6L} + L \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{L}\right) \exp(-\mu_n^2 F_0) \right] \quad (11)$$

式中  $\mu_n = n\pi$ ,  $n=1,2,3,\dots$

$$F_0 = \frac{kt}{L^2} \text{——傅里叶数 (无量纲)}$$

$T_0$ ——初始温度

经过一定时间, 当  $F_0 = \frac{kt}{L^2} > 0.5$  时, 式(11)中的级数求和项变得很小, 可以忽略, 式(11)变为:

$$T(x,t) - T_0 = \frac{J_c L}{\lambda} \left( \frac{kt}{L^2} + \frac{x^2}{2L^2} - \frac{1}{6} \right) \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 当加热时间  $t$  使  $F_0 > 0.5$  后, 任一时刻样品各点温度随  $x$  按抛物线变化, 样品内各点的温升速率相同并保持不变, 样品内两点间温差恒定, 这种热传导状态称为准稳态。准稳态下样品表面与中心面的温度差, 其表达式为

$$\Delta T = T(L,t) - T(0,t) = \frac{J_c L}{2\lambda} \quad (13)$$

由式(13)可以导出准稳态下导热系数的测量公式为

$$\lambda = \frac{J_c L}{2\Delta T} \quad (14)$$

当用有限截面积的平板进行实验时, 样品中心区域的导热可近似看成一维的。经误差分析可以证明当样品横向尺寸为厚度的 6 倍以上时, 将测温点置于样品的中心区域, 非无限大平板误差可以忽略。

由比热的定义, 当样品的横向截面积为  $S$  (即热流通过的面积) 时, 则有以下关系式

$$J_c S = c \rho L S \frac{dT}{dt} \quad (15)$$

由此可得比热为

$$c = \frac{J_c}{\rho L \frac{dT}{dt}} \quad (16)$$

式中:  $dT/dt$ ——准稳态下样品的温升速率, 可以由中心面  $T(0,t) \sim t$  关系曲线求得。

### 3. $J_c$ 的计算

$J_c$  需通过通电加热器的电功率进行计算。因平面薄膜加热器 (薄膜加热器由粘附在绝缘材料上的薄膜电阻构成, 通电时忽略其电阻变化, 其热容也忽略不计) 的热量向两个方向传导, 为准确计算流向样品中心的热流密度, 利用对称性设置样品架, 如图 4 所示, 则向样品中心传导的热流密度为加热器电功率的一半, 即

$$J_c = \frac{U_{\text{加热}}^2}{2Sr} \quad (17)$$

式中:  $U_{\text{加热}}$ ——加热器所加电压 (装置中两个相同的电热薄膜加热器并联接到加热电源);

$r$ ——单个加热器的电阻。

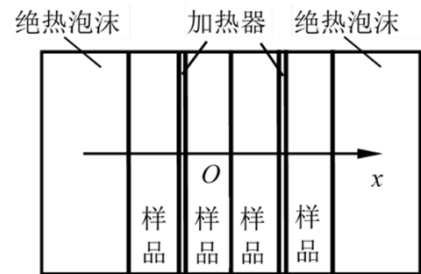


图4 四块样品对称放置示意图

## 三、实验仪器

### 1. 样品台装置

如图 5 所示, 样品台装置包含

- ①——中心面横梁: 承载中心面的热电偶(标注为“中心面热端”);
  - ②——加热面横梁: 承载加热面的热电偶(标注为“加热面热端”);
  - ③——加热薄膜: 给样品加热;
  - ④——隔热泡沫层: 防止散热, 从而保证实验精度;
  - ⑤——锁定杆: 实验时锁定横梁, 防止未松动螺杆⑥时取出热电偶导致热电偶损坏;
  - ⑥——螺杆旋钮: 推动隔热层压紧或松动实验样品和热电偶
- 对应实物照片如图 6。

如图 7，实验室已将样品、热偶、薄膜加热器、泡沫绝热体安装好，不要擅自取下。

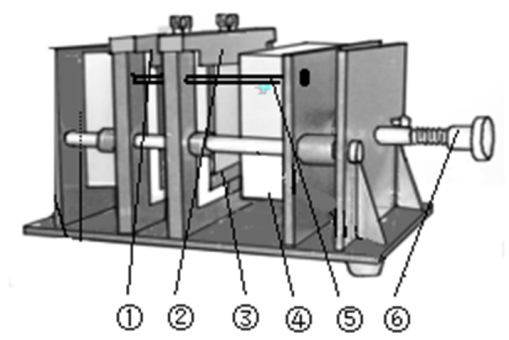


图5 样品台装置

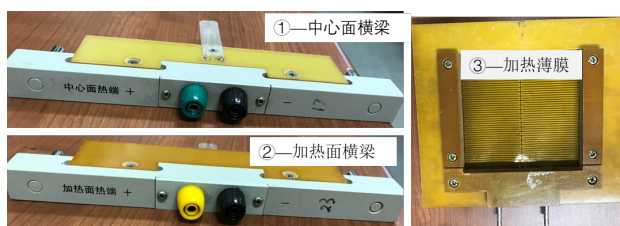


图6 实物照片

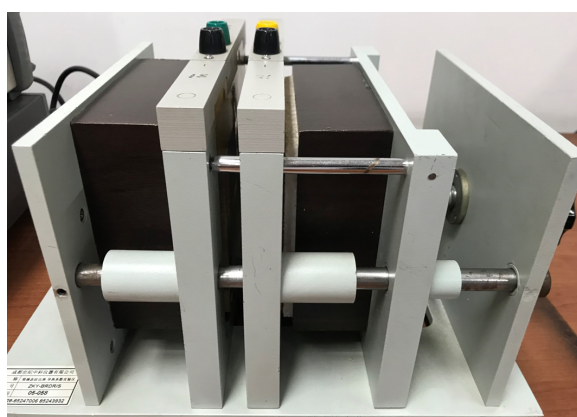


图7 实验装置

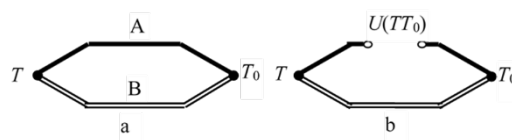


图8 热电偶测温原理

## 2. 测温系统

实验采用铜-康铜热电偶测温，以得到需要的温差及温升速率。热电偶测温原理如下。

由 A、B 两种不同的导体两端相互紧密地连接在一起，组成一个闭合回路，如图 8a 所示。当两接点温度不等 ( $T \neq T_0$ ) 时，回路中就会产生电动势，从而形成电流，这一现象称为热电效应（又称塞贝克效应 seebeck effect），回路中产生的电动势称为温差电动势。如将回路断开，则会产生开路电压  $U(T, T_0)$ ，如图 8b 所示，而且  $U(T, T_0)$  与  $T$ 、 $T_0$  差值有关，可以近似表述为

$$U(T, T_0) = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 \quad (18)$$

当温差较小时，可以忽略二次项按线性看待。

实验时热电偶的测温端应安装在正方形样品中心点附近，为减小因热电偶造成的样品间隙，热电偶采用直径 0.1mm 的铜-康铜丝制造，同时为减少室温波动等对测温的影响，温度或温度差的测量均采用两只同样的热电偶反向串联方式连线，具体如图 9 所示，热电偶冷端浸在温度恒定为  $T_c$  的恒温水槽中（思考：恒温水槽内温度  $T_c$  的大小对测量结果有何影响）。由图 9 同样可知，利用一块数字毫伏表及一个双刀双掷换向开关可以测量加热面与中心面温差  $U_2(T_2, T_1)$ （换向开关位于位置 B）、中心面与冷端的温差  $U_1(T_1, T_c)$ （换向开关位于位置 A）。在本实验涉及的温区内，铜-康铜热电偶的温差电势与其两端温差呈线性关系，其斜率为  $40\mu V/^\circ C$

热偶的两种材料分别用+和-表示，+对应图 8 的 A 金属(粗线)，-对应图 8 的 B 金属(细线)。图 9 的中心面热端和加热面热端对应的实物照片见图 6。恒温水槽为装有水的保温杯(图 10)，保温杯上蓝色接线端对应图 9 恒温水槽的+(A 金属)，无需理会其边上的“中心面冷端”字眼。

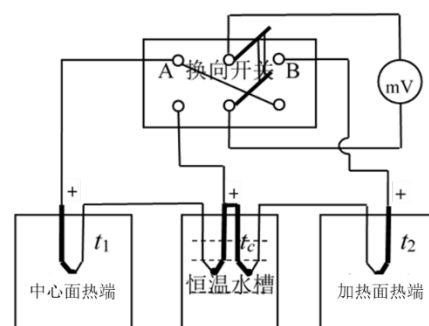


图9 热电偶测温系统



图10 恒温水槽



### 3. 直流稳压电源

实验采用直流稳压电源给两个加热薄膜供电，样品台上两个加热薄膜已并联，外部电源输入端口见图 11。为使测量准确，实验时加热电压控制在 16~18 V 范围内，并注意实验时加热电源先开机调到适当电压后预热几分钟。

### 4. 数字万用表

实验中，使用数字万用表进行电压的测量。用它测量：1) 加热器的加热电压。2) 热电偶输出的加热面与中心面温差  $U_2(T_2, T_1)$  及中心面与冷端的温差  $U_1(T_1, T_c)$ 。

### 5. 秒表

计时仪器采用秒表。



图11 加热薄膜外部电源输入端口

## 四、实验样品

被测样品为有机玻璃（密度：1196kg/m<sup>3</sup>），一套四块，几何尺寸：长与宽均为 90mm，厚度 10mm。

## 五、实验步骤

1. 打开直流稳压电源、数字万用表电源预热。选择好直流稳压电源的使用通道(CH1 或 CH2)，进行电压和电流设置(电压：16V—18V 之间，电流：0.5A)。电源的“OUTPUT”：Off 状态(边上指示灯：暗)。

2. 用万用表电阻档检查图 9 对应的四只热电偶是否完好（热电偶电阻约几欧姆），检查加热器是否完好（单个加热器电阻约 110 欧姆，两者并联后电阻约 55 欧姆），并准确测量、记录加热器电阻值。

3. 观察、确认 2 个样品中间的中心面热偶基本平整，测温端是否在样品中心点附近。确认后，通过螺杆旋钮⑥，使中间的 2 个样品(适度)夹紧热偶。尽量使实验条件符合理论推导模型。

4. 按“On/Off”键，电源的“OUTPUT”：ON 状态(边上指示灯：亮)，用万用表直流电压档测量实验前的加热电压，做好记录。测量完毕：电源恢复 Off 状态。

5. 电路连线：a) 按图 9 所示，连好温度测量电路。b) 电源连到加热器外部电源输入端口(图 11)。

6. 确认电路正确后，测量  $t=0$  时刻的温度数据：初始温度  $T_0$ (使用温度计)、初始中心面温度  $U_1(T_1, T_c)$ 、初始温差  $U_2(T_2, T_1)$ 。数据合理后，准备进一步的测量。(部分万用表 mV 档测量线短接时电压不为 0，如测量值大于 40 $\mu$ V，应对测量结果进行修正。)

7. 进一步的测量，获取温度测量数据。

准备好计时器，按“On/Off”键，电源的“OUTPUT”：ON 状态。注意它们同时开启。每隔 1 分钟测一次中心面与冷端的温差  $U_1(T_1, T_c)$  及加热面与中心面温差  $U_2(T_2, T_1)$ ，共测 25 分钟左右。此时，如果确认已经有了准稳态区间的数据，可以结束测量。请考虑为什么不是时间越长实验数据越好？

8. 断开加热回路，拆下数字万用表，再次测量实验后的加热电压，与实验前的加热电压取平均使用。

9. 实验结束，关闭电源、万用表等仪器，整理好电缆，通过螺杆旋钮⑥松开中间的 2 个样品(图 7)。

## 六、数据处理

画出  $U_1(T_1, T_c) \sim t$ 、 $U_2(T_2, T_1) \sim t$  曲线，从图线判断出现准稳态的时间，得出温差、温升速率，进而求出导热系数、比热。估计进入准稳态时中心面的温度。对准稳态出现后  $U_1(T_1, T_c) \sim t$ 、 $U_2(T_2, T_1) \sim t$  曲线走势进行分析解释。

## 七、选做内容：数字万用表使用练习

参考万用表使用说明，完成以下测量任务，并尽量按照技术指标标示给出完整的测量结果（注意测量应根据被测对象，正确选择输入端子、功能按键、测量量程，使得到的测量结果有效位数尽量多，如果被测量大小无法估计则从高量程开始测量并逐步调整）。

1. 测量函数信号发生器(信号源)输出的正弦交流信号的电压及频率；
2. 电阻直接测量：二端法测量电阻 R 大小；
3. 二极管测量：测量二极管的正向导通电压；
4. 电容测量

➤ **重要提示：** 如果带上电脑，本实验可以随堂完成(教师随堂检查测量数据、数据处理和结果，合格后，本实验即合格。)