



郑州大学 大学物理实验中心

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

# 准稳态法比热·导热系数的测定



# 实验简介



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

导热系数也叫热导率，是反映物体热传导性能的一个物理量。

不同物质导热系数各不相同；而相同物质的导热系数又与其结构、密度、湿度、温度、压力等因素有关。

一般来说，金属的导热系数比非金属的要大，固体的导热系数比液体的大，气体的最小。

由于材料成分的复杂性以及结构的多样性，通常情况下导热系数理论计算的数学模型难以建立，因此各种物质的热导率数值主要是靠实验测定。

导热系数和比热的测量大都用稳态法，要求温度和热流量均要稳定，这在学生实验中很难保证，导致测量的重复性、稳定性、一致性差，误差大。

准稳态法——只要求温差恒定和温升速率恒定，而不必长时间加热达到稳态，就可通过简单计算得到导热系数和比热，克服了稳态法的上述缺点。

# 实验目的



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

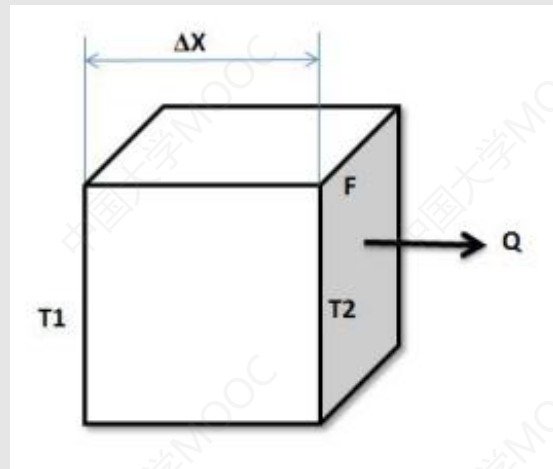
1. 了解准稳态法测量导热系数和比热的原理
2. 学习热电偶测量温度的原理和使用方法
3. 用准稳态法测量不良导体的导热系数和比热



## 1. 导热系数的定义：

导热系数[符号为 $\lambda$ ，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]可定义为单位温度梯度下每单位时间内由单位面积传递的热量：

$$\lambda = - \frac{q_x}{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)} \quad \text{——傅里叶公式}$$



$$Q = q_x \cdot S_F$$

其中，热流方向沿 $x$ ； $q_x$ 为该方向上的热通密度，单位为 $\text{W}/\text{m}^2$ ； $\partial T/\partial x$ 为 $x$ 方向上的温度梯度，单位是 $\text{K}/\text{m}$ 。

## 2. 准稳态法测量原理:

在厚度为 $2R$ 无限大平板两侧同时施加均匀的指向中心面的热流密度 $q_c$ , 则平板各处的温度 $t(x, \tau)$ 将随加热时间 $\tau$ 而变化。

以试样中心为坐标原点, 上述模型的数学描述可表达如下:

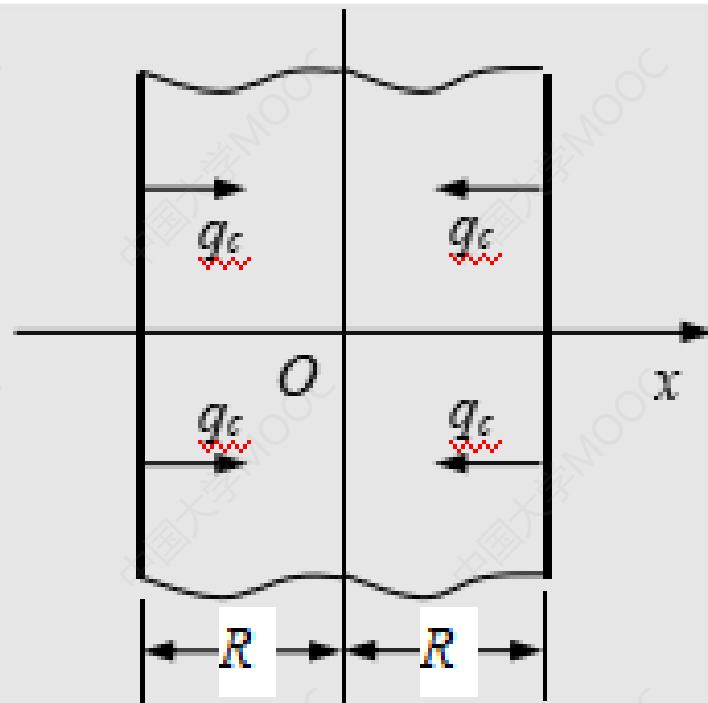


图 1 理想中的无限大不良导体平板

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}$$

边界条件:

$$\text{加热面 } \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} = \frac{q_c}{\lambda'} \quad \text{中心面 } \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0$$

$$\text{初始时刻温度 } t(x, 0) = 0$$

式中  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ ,  $\lambda$  为材料的导热系数,  $\rho$  为材料的密度,  $c$  为材料的比热。

# 实验原理



此方程的解为：

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left( \frac{a}{R} \tau + \frac{1}{2R} x^2 - \frac{R}{6} + \frac{2R}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos \frac{n\pi}{R} x \cdot e^{-\frac{an^2\pi^2}{R^2}\tau} \right) \quad \text{--- (1)}$$

开始加热开始后，样品各处的温度将发生变化，注意，式（1）中的级数求和项由于指数衰减的原因，会随加热时间的增加而逐渐变小，当时间  $\tau > 0.5 \frac{R^2}{a}$  以后，上述级数求和项可以忽略，式（1）变成：

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[ \frac{a\tau}{R} + \frac{x^2}{2R} - \frac{R}{6} \right] \quad \text{--- (2)}$$

这时，在试件中心处  $x=0$ ，因而有：

$$t(0, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[ \frac{a\tau}{R} - \frac{R}{6} \right] \quad \text{--- (3)}$$

在试件加热面处  $x=R$ ，因而有：

$$t(R, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[ \frac{a\tau}{R} + \frac{R}{3} \right] \quad \text{--- (4)}$$

# 实验原理



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

由式 (3) 和 (4) 可见, 当加热时间满足条件  $\tau > 0.5 \frac{R^2}{a}$  时, 在试件中心面、加热面处温度和加热时间成线性关系, 温升速率同为  $\frac{\alpha q_c}{\lambda R}$ , 此值是一个和材料导热性能、实验条件有关的常数, 此时加热面和中心面间的温度差为:

$$\Delta t = t(R, \tau) - t(0, \tau) = \frac{1}{2} \frac{q_c R}{\lambda} \quad \text{--- (5)}$$

由式 (5) 可以看出, 此时加热面和中心面间的温度差  $\Delta t$  和加热时间  $\tau$  没有直接关系, 保持恒定。系统各处的温度和时间是线性关系, 温升速率也相同, 我们称此种状态为准稳态。

当系统达到准稳态时, 由式 (5) 得到:

$$\lambda = \frac{q_c R}{2 \Delta t} \quad \text{--- (6)}$$

根据式 (6), 只要测量出进入准稳态后加热面和中心面间的温度差  $\Delta t$ , 并由实验条件确定相关参量  $q_c$  和  $R$ , 则可以得到待测材料的导热系数  $\lambda$ 。

# 实验原理



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

另外在进入准稳态后，由比热的定义和能量守恒关系，可以得到下列关系式：

$$q_c = c\rho R \frac{dt}{d\tau} \quad \text{--- (7)}$$

比热为：

$$c = \frac{q_c}{\rho R \frac{dt}{d\tau}} \quad \text{--- (8)}$$

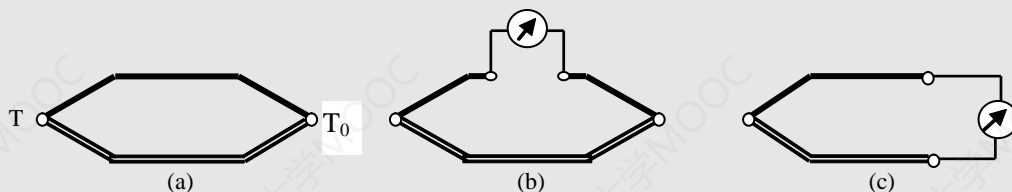
式中 $\frac{dt}{d\tau}$ 为准稳态条件下试件中心面的温升速率（进入准稳态后各点的温升速率是相同的）。

由以上分析可以得到结论：只要在上述模型中测量出系统进入准稳态后加热面和中心面间的温度差和中心面的温升速率，即可由式（6）和式（8）得到待测材料的导热系数和比热。



## 3. 热电偶温度传感器：

热电偶是温度测量仪表中常用的测温元件，它可将温度信号转换成热电动势信号，再通过电气仪表（二次仪表）转换成被测介质的温度。



理论分析和实践证明热电偶具有如下基本定律：

- 1、热电偶的热电势仅取决于热电偶的材料和两个接点的温度，而与温度沿热电极的分布以及热电极的尺寸与形状无关（热电极的材质要求均匀）。
- 2、在A、B材料组成的热电偶回路中接入第三导体C，只要引入的第三导体两端温度相同，则对回路的总热电势没有影响。

# 实验装置介绍

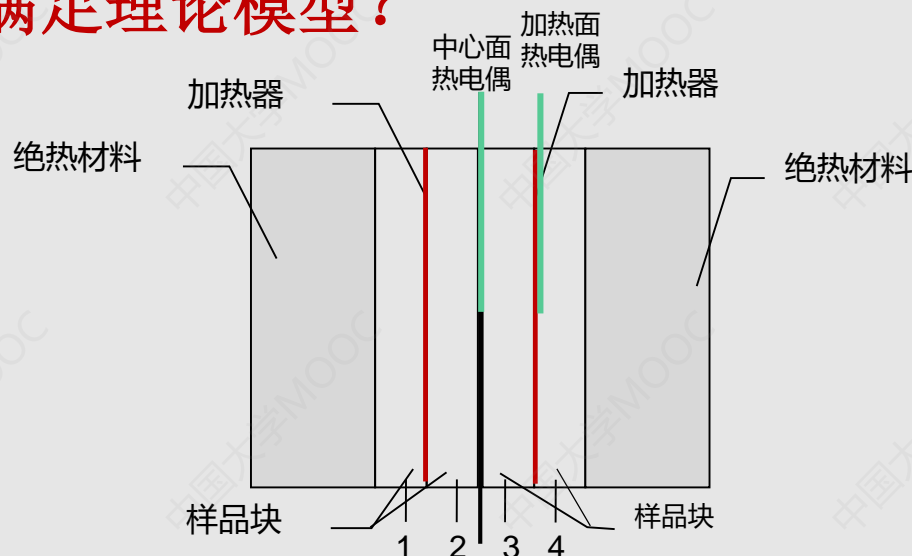


郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

## 如何保证测量满足理论模型？



- ✓ 试件横向尺寸远远大于试件厚度，可认为传热方向只在试件的厚度方向进行！
- ✓ 采用四个相同样品块，两个薄膜加热器分别位于1、2，3、4样品块之间，可认为加热面流入两个相反方向的热流密度为热功率密度的一半。
- ✓ 以薄膜加热器作为热源，加热均匀，加热器本身的热容可忽略不计，热流密度可精确控制。
- ✓ 将两个热电偶分别放置在加热面、中心面中心部位来测量温差和温升速率，测量准确。

# 实验装置介绍



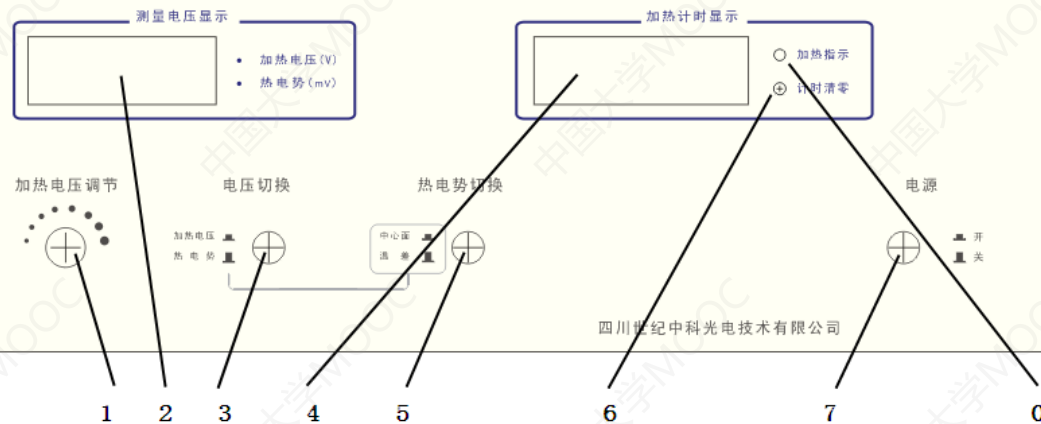
郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

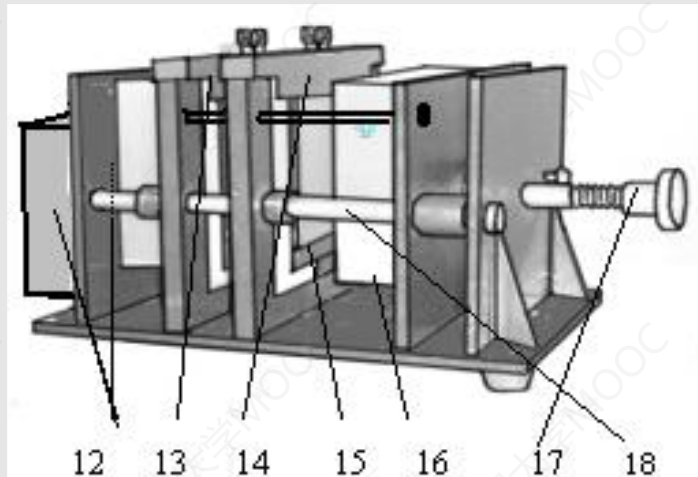
大学物理实验中心

ZKY 世纪中科

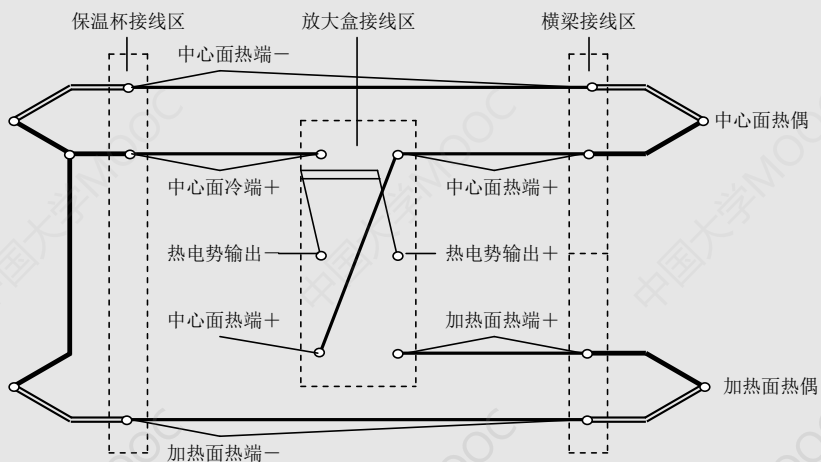
ZKY-BRDR 准稳态法比热·导热系数测定仪



主机前面板



实验装置



线路连接

- 0—加热指示灯
- 1—加热电压调节
- 2—测量电压显示
- 3—电压切换
- 4—加热计时显示
- 5—热电势切换
- 6—计时清零
- 7—电源开关
- 8—电源插座

- 12—放大盒
- 13—中心面横梁
- 14—加热面横梁
- 15—加热薄膜
- 16—隔热层
- 17—螺杆旋钮
- 18—锁定杆

# 实验内容与步骤



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

## 1. 安装样品并连接各部分联线

- 本次实验试样块为橡胶，试样块1与2之间放置一加热膜，试样块3与4间放置另一块加热膜。中心面热电偶的测温端应位于试样块2与3之间的中心位置，而加热面热电偶的测温端位于试样块3与4之间的中心位置，以防止由于边缘效应影响测量精度。
- 通过旋紧旋钮压紧样品。
- 根据实验要求连接好各部分连线（其中包括主机与样品架放大盒，放大盒与横梁，放大盒与保温杯，横梁与保温杯之间的连线），并检查确认。



# 实验内容与步骤



郑州大学

Physics

Experiment

大学物理实验中心

Center

Of

Zhengzhou

University

## 2. 设定加热电压

- 检查各部分接线是否有误，同时检查后面板上的“加热控制”开关是否关上（若已开机，可以根据前面板上加热计时指示灯的亮和不亮来确定，亮表示加热控制开关打开，不亮表示加热控制开关关闭），没有关则应立即关上。
- 开机后，先让仪器预热**10**分钟左右再进行实验。在记录实验数据之前，应该先设定所需要的加热电压，步骤为：先将“电压切换”钮按到“加热电压”档位，再由“加热电压调节”旋钮来调节所需要的电压。（参考加热电压：**18V，19V**）

# 实验内容与步骤



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

## 3.测定样品的温度差和温升速率

- 将测量电压显示调到“热电势”的“温差”档位，如果显示温差绝对值小于**0.004mV**，就可以开始加热了，否则应等到显示降到小于**0.004mV**再加热。
- 确认上述条件后，打开“加热控制”开关并开始记数，数据记入表 1 中。  
(记数时，建议每隔1分钟分别记录一次中心面热电势和温差热电势，这样便于后面的计算。一次实验时间最好在**25分钟**之内完成，一般在**15分钟**左右为宜)
- 当记录完实验数据需要关机时，其操作顺序是：关闭加热控制开关→关闭电源开关→装置冷却。

# 数据记录



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

表 1 导热系数及比热测定

时间 $\tau$ (min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
温差热电势 $V_t$ (mV)															
中心面热电势 $V_n$ (mV)															
每分钟温升热电势 $\Delta V = V_{n+1} - V_n$															

**请注意：根据准稳态法的原理，表格1中数据并不都是能用的！只有温差基本恒定时候的数据才能用来计算导热系数与比热！**

# 数据处理



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

- 准稳态的判定原则是温差热电势和温升热电势趋于恒定。实验中橡胶一般在5~12分钟，处于准稳态状态。有了准稳态时的温差热电势 $V_t$ 值和每分钟温升热电势 $\Delta V$ 值，就可以分别由（6）式和（8）式计算最后的导热系数和比热容数值及其相对误差。
- 其中（6）式和（8）式中各参量值如下：

样品厚度： $R=0.010\text{ m}$ ，橡胶密度： $\rho=1374\text{ kg/m}^3$ 。

- 热流密度计算公式： $q_c = \frac{V^2}{2Fr}$ （ $\text{W/m}^2$ ）

式中 $V$ 为两并联加热器的加热电压， $F=(1/A) \times 0.09\text{ m} \times 0.09\text{ m}$ 为边缘修正后的加热面积， $A$ 为修正系数，对于橡胶， $A=0.85$ 。 $r=110\ \Omega$ 为每个加热器的电阻。



# 数据处理



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

- 铜—康铜热电偶的热电常数为**0.04 mV/K**。即温度每差**1°C**，温差热电势为**0.04 mV**。据此可将温度差和温升速率的电压值换算为温度值：

$$\text{温度差: } \Delta t = \frac{V_t}{0.04} \text{ (K) ,}$$

$$\text{温升速率: } \frac{dt}{d\tau} = \frac{\Delta V}{60 \times 0.04} \text{ (K/s) 。}$$

- 现有橡胶样品的导热系数和比热容的参考值（作为计算误差参考）：

橡胶的导热系数：  $\lambda = 0.426 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

比热容：  $c = 1.19 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

# 注意事项



郑州大学

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

大学物理实验中心

- 注意确保两个热电偶之间、中心面与加热面的位置不要放错：中心面横梁的热电偶应该放到样品2和样品3之间，加热面热电偶应该放到样品3和样品4之间。同时要注意热电偶不要嵌入到加热薄膜里。
- 由于测量时间较长，本实验只测试橡胶试样，为保证实验正常、器件与设备安全，禁止擅自拆卸装置、更换试样！

# 谢 谢!



郑州大学 大学物理实验中心

Physics Experiment Center Of Zhengzhou University

---