

不良导体导热系数的测定

一、实验背景


1. 导热系数的定义与意义

导热系数 (λ)：材料直接传导热量的能力，又叫热导率。


$\frac{dQ}{dt}$ ：单位时间内传导的热量

$\frac{dT}{dx}$ ：温度梯度

S ：横截面积

A diagram with two arrows originating from the text ' $\frac{dQ}{dt}$ ：单位时间内传导的热量'. One arrow points to ' $\frac{dT}{dx}$ ：温度梯度' and the other points to ' S ：横截面积'.

傅里叶导热定律：

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right) S$$
A red arrow points from the negative sign in the equation to the text below.

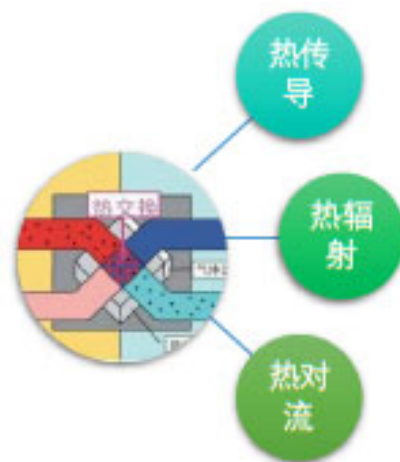
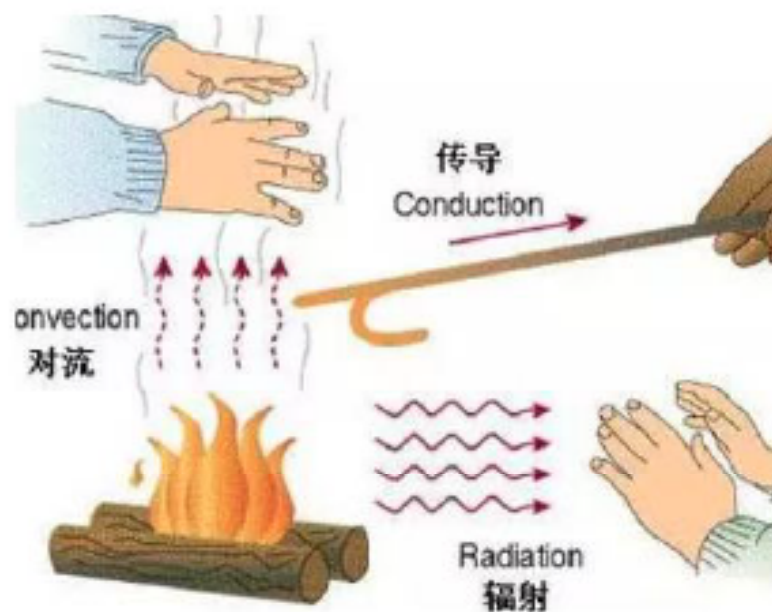
热传导的方向与温度梯度的方向相反

导热系数的单位为瓦特·米⁻¹·开⁻¹

一、实验背景

2. 热传递的途径

1. **热传导**：不同物体之间或同一物体内部，通过原子、分子间碰撞来实现热量从高温区传递到低温区，物体并不作相对运动。是固体中热传递的主要方式。
2. **热对流**：流体内部或流体之间质点发生相对位移，由原子和分子的相对运动完成的热量传递过程。
3. **热辐射**：物体由于具有温度而向外辐射电磁波，借助电磁波将热量从一个物体传递到另一个物体。



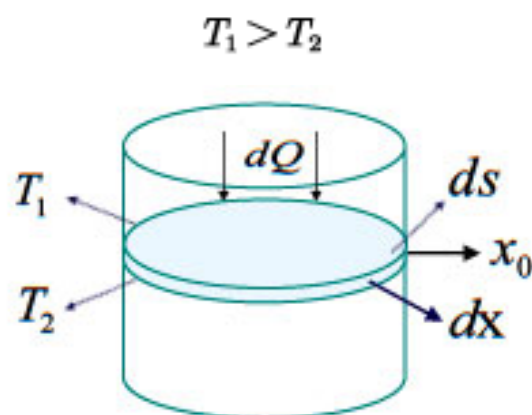
三、实验原理

1. 实验设计思路

依据 傅里叶导热定律: $\frac{dQ}{dt} = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x_0} S$ (1)

要测得导热系数 λ , 需解决的两个关键问题:

- 在材料内造成一个温度梯度并确定其数值 $\frac{dT}{dx}$
- 测量材料内由高温区向低温区的传热速率 $\frac{dQ}{dt}$



λ : 导热系数, 可见热导率的物理意义: 在温度梯度为一个单位的情况下, 单位时间内垂直通过单位面积截面的热量。

三、实验原理

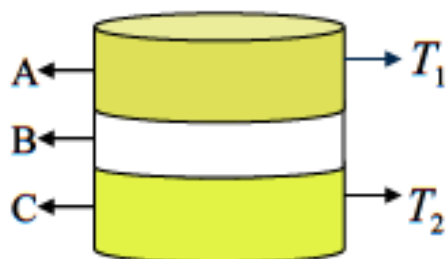
2. 设计方案

(1) 选择稳态法：动态法中温度变化、热量变化不易求得，故本实验设计一系统达到稳态，在稳态下进行测量。

(2) 样品设计原则：(a) 规则对称，圆形为佳；

(b) 线度远大于其厚度，以减小侧面散热面积，近似处理时可忽略侧面散热。

(3) 设计如下：



A、C为热的良导体：金属铜
B为样品（不良导体）

不断地给A加热，热量通过样品B传到C铜盘，
C铜盘将热量不断地向周围环境散出。

↓ 从而实现

一段时间后（稳态时），A和C分别维持在恒定的
温度 T_1 ， T_2 ，B内在垂直于样品表面的方向
上形成稳定的温度梯度。

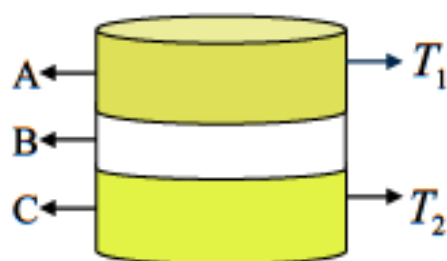
三、实验原理

3. 推算过程

对A，持续被加热，将热量传递给B，同时与环境也有热交换。（过程相对复杂。）

对C，B将热量传递给C，同时向环境散热。因此，我们基于C进行讨论。

稳态时， T_1 、 T_2 保持不变，通过样品B的传热速率和C向侧面和下面的散热速率相同。



A、C为热的良导体：金属铜
B为样品（不良导体）

得：

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{T_{10}} = \left. \frac{dq}{dt} \right|_{T_{20}} \quad (2)$$

T_{10} 、 T_{20} 是稳态时样品上下表面温度，

$\frac{dQ}{dt}$ 是样品的传热速率， $\frac{dq}{dt}$ 是铜盘C的散热速率

由于样品B厚度 h_B 远小于样品直径 D （ $h_B \ll D$ ），忽略侧面散热，有：

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{x_0} = \frac{T_{10} - T_{20}}{h_B} \quad (3)$$

三、实验原理

3. 推算过程

将 (2) 和 (3) 代入 (1) 傅里叶定律得：

$$\left. \frac{dq}{dt} \right|_{T_{20}} = -\lambda \frac{T_{10} - T_{20}}{h_B} S \quad (4)$$

$$\left. \frac{dq}{dt} \right|_{T_{20}} = -\lambda \frac{T_{10} - T_{20}}{h_B} S \quad (1)$$

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{T_{10}} = \left. \frac{dq}{dt} \right|_{T_{20}} \quad (2)$$

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{x_0} = \frac{T_{10} - T_{20}}{h_B} \quad (3)$$

这样，我们将问题转化为求铜盘C在 T_{20} 下散热速率。

对铜盘C，根据比热定理，其散热速率可表达为：

$$\left. \frac{dq}{dt} \right|_{T_{20}} = -mc \left. \frac{dT}{dt} \right|_{T_{20}} \quad (5)$$

其中， m 为铜盘C的质量， c 为铜的比热容。

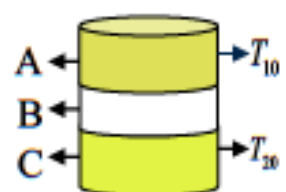
从而，对铜C盘的散热速率的测量转化为对铜板C冷却速率的测量。

三、实验原理

3. 推算过程

测量铜盘C冷却速率方法：在达到稳态后，移去样品B，用铜盘A直接对铜盘C加热，使其温度高于稳态时的温度 T_{20} ，再移去铜盘A，让其自然冷却，直到温度低于 T_{20} ，测出温度随时间的变化关系，用逐差法求冷却速率 $\left. \frac{dT}{dt} \right|_{T_{20}}$ 。

而在测散热速率时， $\left. \frac{dT}{dt} \right|_{T_{20}}$ 是铜盘C全部表面暴露于空气中的冷却速率，而实验中，铜盘C的上表面是被样品覆盖的，因此，需要将式（5）修正为：


$$\left. \frac{dq}{dt} \right|_{T_{20}} = -mc \left. \frac{dT}{dt} \right|_{T_{20}} \cdot \frac{\pi R_C^2 + 2\pi R_C h_C}{2\pi R_C^2 + 2\pi R_C h_C} \quad (6)$$

其中， m 为铜盘C的质量， c 为铜盘的比热容， R_C 和 h_C 分别是铜盘C的半径和厚度。

三、实验原理

3. 推算过程

联立（4）和（6）得：

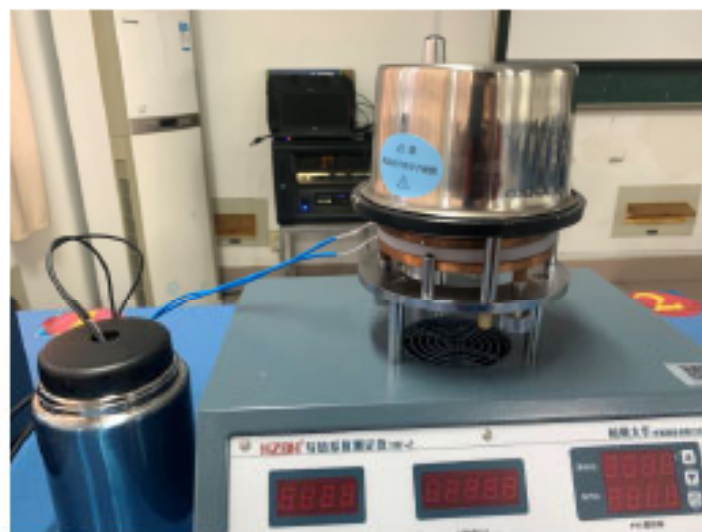
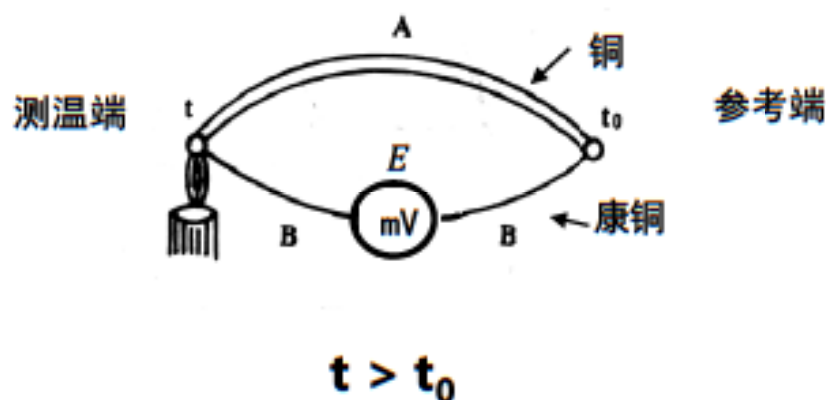
$$\lambda = -mc \frac{2h_c + R_c}{2h_c + 2R_c} \cdot \frac{1}{\pi R_B^2} \cdot \frac{h_B}{T_{10} - T_{20}} \cdot \left. \frac{dT}{dt} \right|_{T_{20}} \quad (7)$$

m 为铜板C的质量， c 为铜板的比热容， R_c 和 h_c 分别是铜板C的半径和厚度， R_B 和 h_B 分别是样品B的半径和厚度。

三、实验原理

3. 推算过程

实验中用热电偶的温差电动势来测量稳态温度及自然冷却速度



在一定的温度范围内，当参考端的温度不变时，温差电动势 E 与测温端的温度值，可近似为线性关系。因此，本实验中我们有：

$$\frac{dE}{E_{10} - E_{20}} = \frac{dT}{T_{10} - T_{20}} \quad (8)$$

三、实验原理

3. 推算过程

联立（7）和（8）得比热系数的最终测量式：

$$\lambda = -mc \frac{2h_c + R_c}{2h_c + 2R_c} \cdot \frac{1}{\pi R_B^2} \cdot \frac{h_B}{E_{10} - E_{20}} \cdot \left. \frac{dE}{dt} \right|_{E_{20}}$$

式中的 R_B 、 h_B 分别为样品的半径和厚度， m 为铜盘C的质量、 R_c 和 h_c 分别是铜盘C的半径和厚度，均可直接测量。

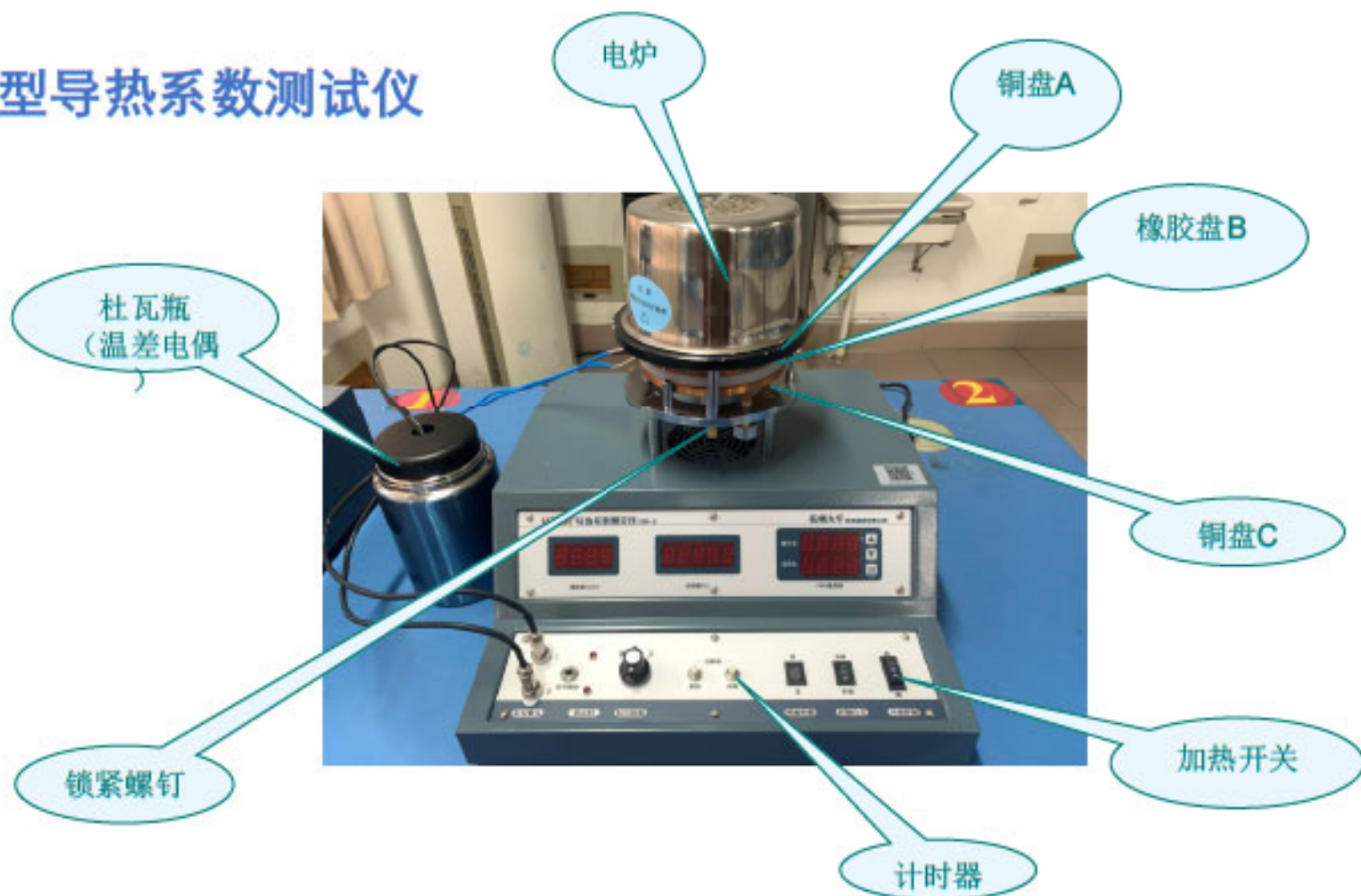
E_{10} 和 E_{20} 分别是铜盘A、铜盘C稳态时电动势（对应温度），

$c = 0.385 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 为铜的比热容。

- ◆ 先在稳态时，测得 E_{10} 和 E_{20} 。
- ◆ 再测铜盘C冷却速率 $\left. \frac{dE}{dt} \right|_{E_{20}}$ ，即：在达到稳态后，移去样品B，用铜盘A直接对铜盘C加热，使铜盘C电压值高于 E_{20} ，再让其自然冷却，直到电压值低于 E_{20} ，测出电压值随时间的变化关系，用逐差法求冷却速率 $\left. \frac{dE}{dt} \right|_{T_{20}}$ 。

四、实验仪器

YBF-2型导热系数测试仪



五、实验内容与步骤

1. 测量样品盘B稳态时上下表面温度 E_{10} 和 E_{20}

(1) 先向下调节三个调节螺钉至较低位置，将铜盘C放在三个调节螺钉上，样品盘B放在铜盘C上面，然后将铜盘A放在样品盘B上，并用固定螺母固定铜盘A在机架上（使得A盘被固定），再向上调节三个调节螺钉，使样品盘B的上下两个表面与铜盘A和铜盘C紧密接触。

(2) 在杜瓦瓶中放入冰水混合物，将热电偶的冷端（黑色）插入杜瓦瓶中，将热电偶的热端（蓝色）分别插入铜盘A和铜盘C侧面的小孔中，并分别将其插入铜盘A和铜盘C的热电偶连线连接到仪器面板的传感器 I、II 上。

（注意：热端放置热电偶的洞孔应与杜瓦瓶同侧，以尽量避免实验中拉扯到连接线。）

五、实验内容与步骤

(3) 接通电源，将温度控制器温度设定在80℃，加热开关切换到自动控制，开始加热。

(4) 待温度测量值达到目标温度时，启动计时器，每隔2分钟读取 E_1 和 E_2 的值填入表1，待 E_2 的读数在10分钟内不再变化时（波动小于0.01mV），说明已达到稳态，记录此时的 E_1 和 E_2 的值，也就是分别为 E_{10} 和 E_{20} 。

表1数据, 确定稳态时的 E_{10} , E_{20} 值

表1

[illegible]

五、实验内容与步骤

2. 测量稳态时铜盘C的冷却速率

(1) 将“选通开关”置于Ⅱ，移开铜盘A，取下样品盘B后，再使铜盘A与铜盘C直接接触，加热铜盘C，当温度高于 E_{20} 值0.4 mV再移开铜盘A，让铜盘C自然冷却。启动计时器，每隔30秒记录此时的 E_2 读数，填入表2。

表2数据，用逐差法求冷却速率 $\left. \frac{dE}{dt} \right|_{E_{20}}$

表2

t(s)										
E_2 (mv)										

(中间有一个 E_2 值应约等于 E_{20})

六、实验内容与步骤

3. 测量样品盘B的几何尺寸、记录铜盘C的质量及几何尺寸。

(1) 用游标卡尺测量样品盘B的直径 D_B 和厚度 h_B 各5次，填入表3。

(2) 记录铜盘C的质量 m (g)、半径 R_C (mm)、和厚度 h_C (mm)，填入表3。

七、数据表格

3. 由表3测出 D_B 、 h_B 的平均值，并记录 m 、 R_c 、 h_c 。

表3

次数	1	2	3	4	5	平均值
$D_B(\text{mm})$						
$h_B(\text{mm})$						
$R_c(\text{mm})$						
$h_c(\text{mm})$						
$m(\text{g})$						

注：用游标卡尺多次测量样品盘B的直径和厚度取平均值求得 R_B 和 h_B 。

散热盘（下铜盘）质量 $m=824\text{g}=0.824\text{kg}$

八、数据处理要求

1. 由表2取 E_{20} 的前后三、四组数据(为 E_{21} 、 E_{22} 、 E_{23} )得表4, 用逐差法求冷却速率 ($\frac{dE}{dt}\bigg|_{E_{20}}$)。

表4

$E_2(\text{mv})$	E_{21}	E_{22}	E_{23}	E_{24}	E_{25}	E_{26}	E_{27}	E_{28}
				$\approx E_{20}$				

$$\frac{dE}{dt}\bigg|_{E_{20}} = \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{30} [(E_{25} - E_{21}) + (E_{26} - E_{22}) + (E_{27} - E_{23}) + (E_{28} - E_{24})]$$

2. 计算 λ :
$$\lambda = -mc \frac{2h_c + R_c}{2h_c + 2R_c} \cdot \frac{1}{\pi R_B^2} \cdot \frac{h_B}{E_{10} - E_{20}} \cdot \frac{dE}{dt}\bigg|_{E_{20}}$$

3. 计算相对不确定度

$$A_\lambda = \left| \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\lambda_0} \right| \times 100\% \quad \text{标准值} \quad \lambda_0 = 0.183 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

九、注意事项

- 加热后在移动铜盘和样品盘时要用手套，防止烫伤；
- 须保证样品盘与铜盘间接触紧密无间隙。