



实验5、虚拟仿真实验— 不良导体热导率的测量

物理实验（一）

一、实验目的

1. 了解热传导现象的物理过程
2. 学习用稳态平板法测量不良导体的热导系数
3. 测量铜盘的散热速率

二、实验仪器

1. 虚拟仿真实验系统地址: <http://aryun.ustcori.com:3230>

账号: SZDX+学号 (忽略加号), 密码: 自行设定

2. 不良导体热导率的测量

3. 实验仪器: 导热系数测量仪、杜瓦瓶、自耦调压器、数字电压表、秒表、游标卡尺、橡胶盘

三、实验原理/ 3.1 导热系数简介

导热系数（又叫热导率）是反映材料导热能力大小的物理量。热传导是热交换的三种基本形式（热传导、热对流和热辐射）之一，是工程热物理、材料科学、固体物理及能源、环保等各个领域的重要研究课题。

材料内部热量的传递载体有两种：原子围绕平衡位置的振动以及自由电子的迁移。在金属中电子和晶格振动均起重要作用，在绝缘体和大部分半导体（不良导体）中晶格振动起主导作用。

因此，材料的导热系数不仅与材料的物质种类相关，还与材料的微观结构、温度、压力及杂质含量有关。在科学实验和工程设计中，所用材料的导热系数都需要用实验的方法精确测定。

三、实验原理/ 3.1 导热系数简介

1882 年法国科学家傅里叶(J.Fourier)建立了热传导理论。当物体内部有温度梯度存在时,就有热量从高温处传递到低温处。傅里叶指出,在 dt 时间内通过横截面积 dS 的热量 dQ ,正比于物体内的温度梯度,其比例系数即导热系数,

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} dS \quad (1)$$

式中 $\frac{dQ}{dt}$ 为传热速率, $\frac{dT}{dx}$ 为传热方向上的温度梯度,负号表示热量由高温区流向低温区域, λ 是导热系数,单位是 $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ 。对于各向异性材料,各个方向的导热系数不相同,因此热导率常用张量来表示。



三、实验原理/ 3.2 热导系数的测量

图1是不良导体热导系数测量装置的原理图。各部分为：A-传热圆筒、B-待测样品、C-铜盘、D-底座、E-红外灯、G-数字电压表、H-单刀双掷开关、J-杜瓦瓶。为保证传热稳定，传热圆筒A、待测样品B和散热铜盘C三者的表面密切接触，如图2所示。温度用热电偶的温差电动势表示，杜瓦瓶装有冰水混合物，为热电偶提供参考温度。

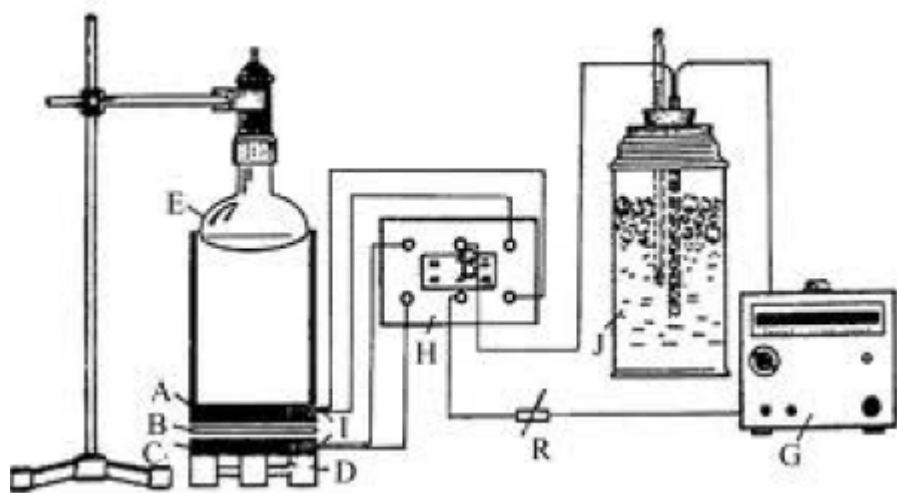


图1 不良导体热导系数测定装置图

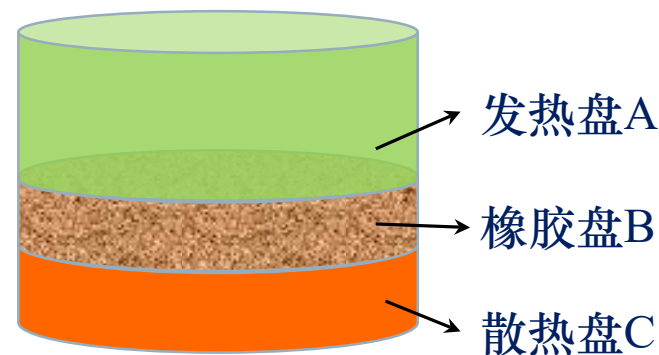


图2 发热盘，待测盘和散热盘

三、实验原理/ 3.2 热导系数的测量

实验中，维持待测盘的上表面A有稳定温度 T_1 ，下表面铜盘C有恒定温度 T_2 （侧面近似绝热）。根据(1)式，在稳态时通过样品的传热速率可以写为，

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{h_B} S_B \quad (2)$$

式中 h_B 为样品的厚度， $S_B = \pi R_B^2$ 为样品上表面的面积（ R_B 为样品盘的半径）， $(T_1 - T_2)$ 为待测样品盘的上、下表面的温度差， λ 为导热系数。

在稳态条件下(T_1 和 T_2 的值恒定不变)，通过待测样品盘B的传热速率与铜盘C向周围环境散热的速率相等，即(2)式中的 dQ/dt 。

三、实验原理/ 3.2 热导系数的测量

铜盘C在稳态条件下的散热速率 dQ/dt ，可以通过铜盘C的在不与样品接触时的自由散热速率 dQ'/dt (T_2 附近) 得到。由于铜盘C的稳态散热面积为 $\pi R_C^2 + 2\pi R_C h_C$ ，自由散热面积为 $2\pi R_C^2 + 2\pi R_C h_C$ ，因此，

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\pi R_C^2 + 2\pi R_C h_C}{2\pi R_C^2 + 2\pi R_C h_C} \cdot \frac{dQ'}{dt} = \frac{R_C + 2h_C}{2R_C + 2h_C} \cdot \frac{dQ'}{dt} \quad (3)$$

其中 R_C 和 h_C 分别是铜盘C的半径和厚度。根据比热容的定义，自由散热速率可写为，

$$\frac{dQ'}{dt} = mc \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

其中 m 和 c 分别为铜盘C的质量和比热容， dT/dt 为铜盘C的冷却速率。由式(2)、(3)和(4)可得样品B的导热系数 λ 为：



三、实验原理/ 3.2 热导系数的测量

$$\lambda = mch_B \frac{R_C + 2h_C}{2\pi R_B^2 (T_1 - T_2)(R_C + h_C)} \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

因此只要测出铜盘C的自由冷却速率，代入相关的参数即可求出样品的导热系数。

本实验用数字电压表测得的热电偶的温差电动势表示温度。热电偶的温度-电压系数是定值，根据(5)式可知，只需测定电压以及电压的变化率，不需计算具体的温度值。加热装置通过自耦调压器和红外灯来实现。通过维持加热电压等于110V，待系统达到稳态，记录稳态下铜盘C的电压值，然后测量铜盘C在该稳态电压值附近的自由散热系数，结合质量、厚度等参数即可得到该稳态下的样品的导热系数。

四、实验内容 / 4.1 操作提示

点击“开始实验”后，可以看到实验台上有自耦调压器、杜瓦瓶、热导系数测试仪主仪器（包括红外灯、保温圆筒、支架等）和数字电压表，如图3所示。双击主测试仪可弹出放大图，如图4所示。单击鼠标左键可以把红外灯向上移出，然后可把保温圆筒向右移开（相连的电线断开时方可移动），如图5所示。待测橡胶盘和游标卡尺位于左下角的“实验仪器”菜单里。



图3 稳态法测不良导体实验台



图4 主仪器放大图

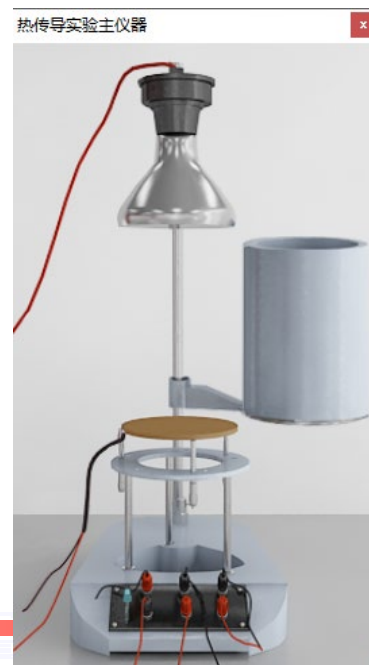


图5 仪器移开图



四、实验内容/4.1 操作提示

把游标卡尺从“实验仪器”菜单取出放置在实验台，双击后可弹出用来测量的放大图，如图6所示。可用鼠标点击游标卡尺副尺的“锁定旋钮”和“拖动旋钮”进行操作和测量。点击上方的“开始测量”按钮后，会在左侧出现待测物体：铜盘和橡胶盘。

放大图的下方为游标卡尺的读数区域。可先把副尺向右移动一段距离，然后把待测物体拖到游标卡尺里进行测量和读数。这里游标卡尺的精度为 0.02mm ，读数精确到小数点后两位。

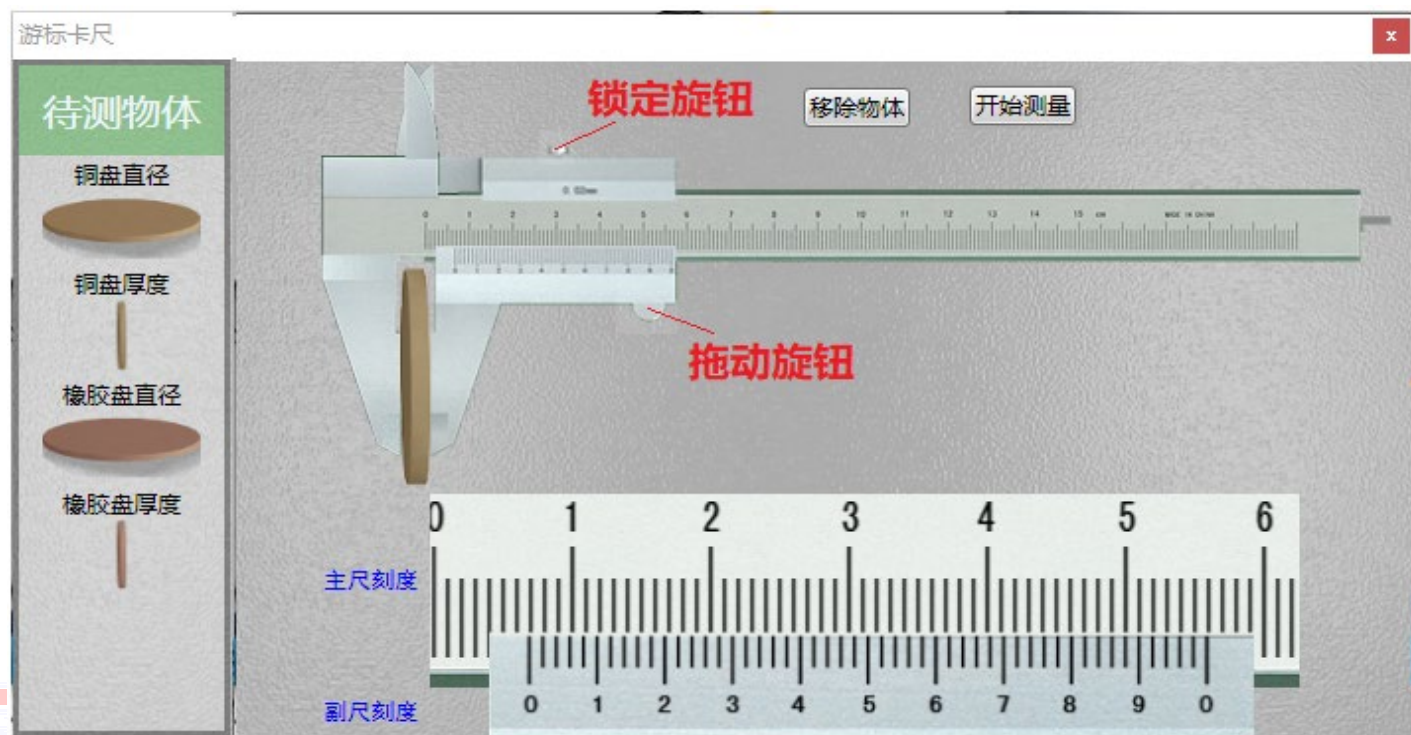


图6 游标卡尺测量图

四、实验内容/4.1 操作提示

双击“自耦调压器”可以看到放大图，可用鼠标进行电压调节。双击“数字电压表”可弹出放大图，使用前需进行调零。本实验中用的数字电压表的量程为 $20mV$ （最左边白色按钮）。

图7为电路连接图，其中连线1和2是加热盘A的温度测量端，连线3和4是散热盘C的温度测量端，可以通过主仪器底座的单刀双掷开关进行切换（向上测的是A盘温度，向下测的是C盘温度）。测量结果显示在数字电压表。

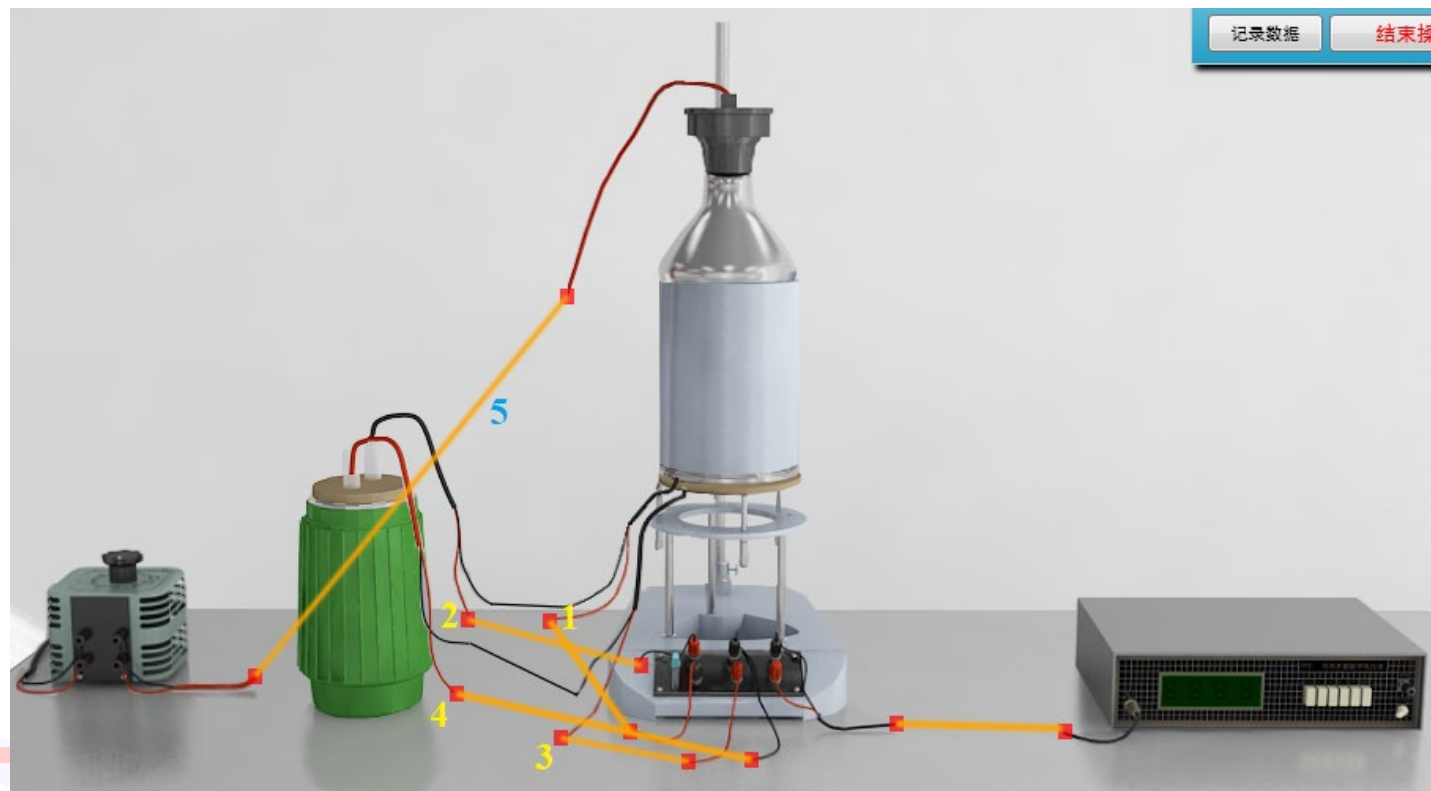


图7 线路连接图

四、实验内容 / 4.2 测量橡胶盘的导热系数

- 步骤：
1. 用游标卡尺测量铜盘和橡胶盘的直径和厚度，记录表格1；
 2. 打开主仪器放大图，把红外灯上移（需先断开红外灯的连线5），同时把保温桶移开（需先断开加热盘的连线1），然后把橡胶盘放置在铜盘C上，最后移回保温桶和红外灯；
 3. 按图7连接电路；
 4. 双击“数字电压表”，并调零和选择量程（ $20mV$ ）；
 5. 双击“自耦调压器”，把电压调至 $110V$ ，等待样品导热达到稳态；等待过程中不断切换单刀双掷开关，并观察测量值，如果在10分钟内加热盘和散热盘的温度基本没有变化，则可认为达到稳态（为缩短达到稳态时间，可先将红外灯电压调至 $200V$ 左右，大约5分钟后再将到 $110V$ ）；
 6. 记录稳态下加热盘A的电压 V_A 和铜盘C的电压 V_C ；



四、实验内容 / 4.2 测量橡胶盘的导热系数

7. 移开红外灯（需先断开红外灯的连线5）和保温桶（需先断开加热盘的连线1），取出橡胶盘，再把红外灯和保温桶复位，并连接好线；
8. 使铜盘C加热至高于稳态温度10度左右（电压增加约0.42mV，建议不要高太多，否则降温值 V_C 需要较长时间）；
9. 把调压器电压减小为0，移开红外灯和保温桶，让铜盘C自由冷却，每隔30s记录一次电压值，选择最接近 V_C 前后的6个数据，记录表格2；
10. 用逐差法求出铜盘C的冷却速率，并计算橡胶盘的导热系数；
11. 用作图法求出冷却速率。

操作步骤也可参考左侧菜单里的在线演示视频，测量结果需记录在自己的实验数据表格。

四、实验内容/4.3 数据记录

已知：铜盘质量：800g， 橡胶盘质量：200g
铜的比热容：370.8J/(Kg·℃)

测量次数	1	2	3	平均值
铜盘直径(mm)	129.24	129.22	129.22	129.2267
铜盘厚度(mm)	7.18	7.20	7.20	7.1933
橡胶盘直径(mm)	128.56	128.60	128.64	128.60
橡胶盘厚度(mm)	8.04	8.02	8.00	8.02

表1 铜盘和橡胶盘的尺寸测量

稳态时加热盘A的温度 T_1 对应的电压：3.43mV
稳态时铜盘C的温度 T_2 对应的电压：2.29mV

时间	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
电压 V_C	2.75	2.70	2.65	2.60	2.55	2.51	2.46	2.42	2.38	2.33	2.29	2.26	2.22	2.18	2.14

表2 铜盘的自由冷却速率测量

四、实验内容 / 4.4 数据处理

- 逐差法计算冷却速率，选择靠近平衡温度的六个温度点：

时间	0	30	60	90	120	150
电压 V_C	2.38	2.33	2.29	2.26	2.22	2.18

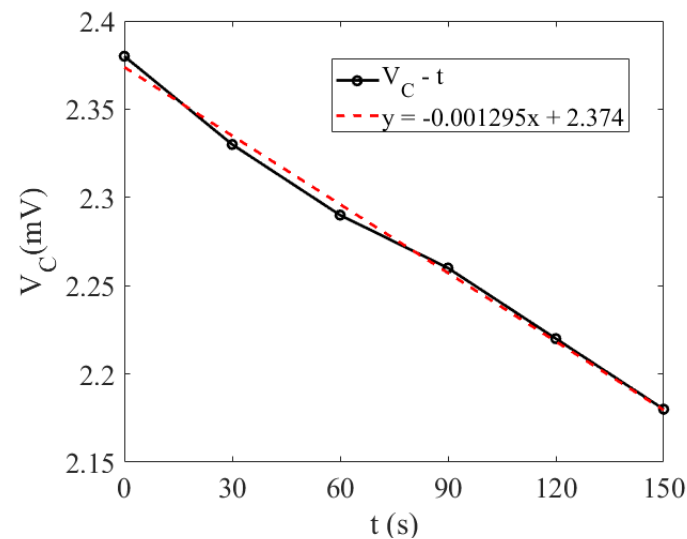
$$\frac{dT}{dt} = \frac{(2.18 - 2.29) + (2.22 - 2.33) + (2.26 - 2.38)}{3 \times 30 \times 3} = -0.001259 \text{ mV/s}$$

- 画图法得到冷却速率（如右图）： $\frac{dT}{dt} = -0.001295 \text{ mV/s}$

- 代入数据可计算橡胶盘的导热系数的大小（用其中一种方法的 $\frac{dT}{dt}$ 即可）：

$$\lambda = mch_B \frac{R_C + 2h_C}{2\pi R_B^2 (T_1 - T_2)(R_C + h_C)} \frac{dT}{dt}$$
$$= 0.12 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

结果保留两位有效数字




拟合得到的冷却速率



四、实验内容 / 4.5 思考题

1. 试分析实验中产生误差的主要因素以及实验中是如何减小误差的？
2. 傅里叶定律中 $\frac{dQ}{dT}$ (传热速率) 是不易测准的量。本实验如何巧妙地避开了这一难题？



2022.4.19

深圳大学大学物理教学实验中心

再见!

