

《基础物理实验》实验报告

实验名称 温度与热导率的测量 指导教师
姓名 李果 学号 2022K8009906028 分班分组及座号 01-09-8号 (例: 1-04-5号)
实验日期 2023 年 12 月 18 日 实验地点 427 调课/补课 ☐ 是 成绩评定

温度与热导率的测量

1 实验目的

1.1 动态法测定良导体的热导率

1. 通过实验学会一种测量热导率的方法。
2. 解动态法的特点和优越性。
3. 认识热波, 加强对波动理论的理解。

1.2 温度的测量和温度计的设计

1. 用电位差计测热电偶的温差电动势。
2. 用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的温度特性曲线。
3. 设计非平衡电桥实现对热敏电阻的实时测量。

2 实验器材

2.1 动态法测定良导体的热导率

采用的是综合实验仪器——由用绝热材料紧紧包裹其侧表面的圆棒状样品、热电偶阵列、以及实现边界条件的脉动热源、冷却装置组成, 其中样品我们用的是铜(12个热电偶)、铝(8个热电偶)而所谓的热电偶阵列实际上就是一种传感器仪器结构框图的结构分为样品单元、控制单元和结构单元3个部分, 对应手动控制和程控两种方式也仅仅是记录单元不同。主机这样设计的好处在于, 只要我们测量出了轴线上各点的温度分布, 就可确定整个棒体上的温度分布, 大大简化了实验操作。

主机示意图和具体的结构框图可见下图:

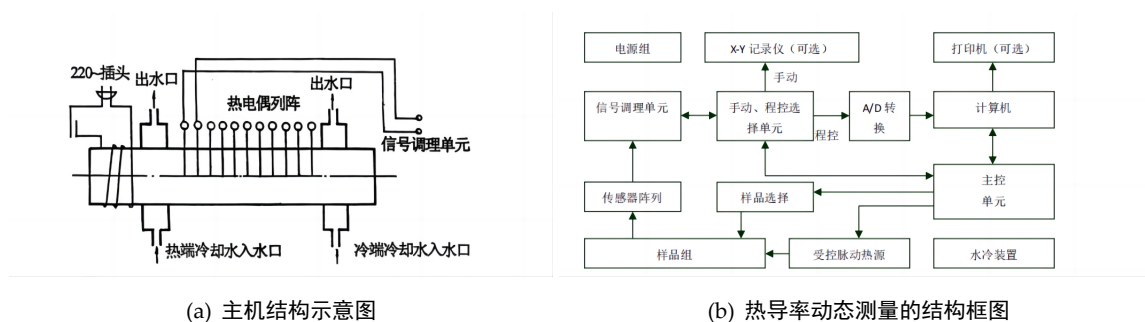


图 1: 示意图

2.2 温度的测量和温度计的设计

为进行温度计的控温,我们采用 DHT-2 型热学实验仪,其前面板下图:

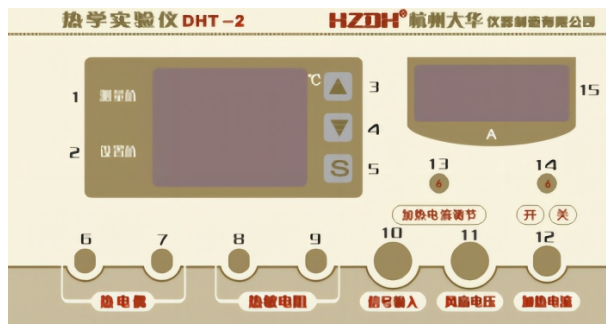
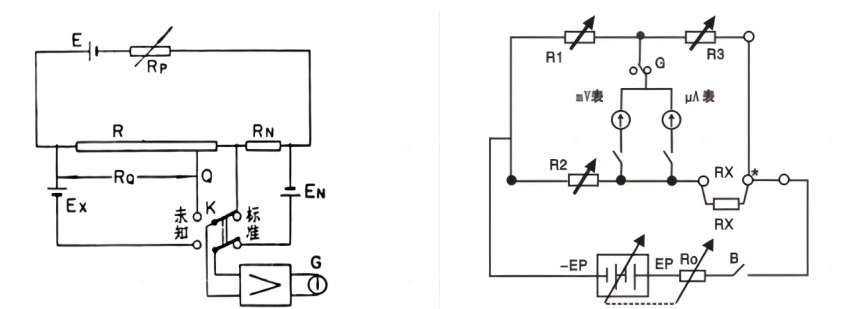


图 2: DHT-2 型热学实验仪的前面板示意图

为测量热电偶的电压,我们采用 UJ36a 型携带式直流电位差计;为了利用平衡电桥测温度计的电阻,我们采用 DHQI-5 型教学用多功能电桥。关于这两个装置的实验电路图如下:



(a) UJ36a 型携带式直流电位差计的补偿法 (b) DHQJ-5 型教学用多功能电桥的补偿法

图 3: 电路示意图

3 实验原理

注:根据实验讲义要求,简明扼要地梳理实验原理,并且这一部分没有超过两页。

3.1 动态法测定良导体的热导率

根据热传导定律,垂直于面积为 A 的截面在单位时间内被流的热量,即其热流可以用公式

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

描述,其中 k 即待测的热导率。

我们对上式求微分并考虑热平衡方程,则有:

$$C\rho A\,dx\frac{\partial T}{\partial t} = d\frac{\partial q}{\partial t} = -kA\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\,dx$$

其中 C, ρ 分别是材料的比热容和密度, 这样我们就得到了热流方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, D := \frac{k}{C\rho}$$

这里的 D 称之为热扩散系数。

上式的解依赖于边值条件。特别地,我们令温度热端随时间的变化是简谐的,即满足

$$T = T_0 + T_m \sin \omega t$$

而冷端浸入冷水冷却,从而保持恒定的低温 T_0 ,则上式的解为:

$$T = T_0 - \alpha x + T_m \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x\right) \cdot \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2D}}x\right)$$

其中 T_0 是直流成分而 α 是线性成分的斜率。

此外,通过上式我们可以得到结论:当我们设热端处的温度按简谐方式变化时,热流将以不断衰减的波动的形式在棒内向冷端传播,我们称其为热波;此外,关于热波,我们有波速为: $V = \sqrt{2D\omega}$, 热波波长为: $\lambda = 2\pi\sqrt{\frac{2D}{\omega}}$ 。

因此,若已知热端温度变化的角频率,则仅需要测出波速或者波长就可以求出热导率:

$$V^2 = 2\frac{k}{C\rho}\omega \Rightarrow k = \frac{V^2 C\rho}{4\pi f} = \frac{V^2 C\rho T}{4\pi}$$

这里的 f, T 分别为热端温度按照简谐规律变化的频率和周期。根据这个公式,我们就可以用所测得的数据来计算热导率 k 。

3.2 温度的测量和温度计的设计

3.2.1 用电位差计测热电偶的温差电动势

温差电动势在一定范围内有:

$$Ex \approx \alpha(t - t_0)$$

这是我们进行测量的原理。下面三个图很好地呈现了实验原理与设计思路:

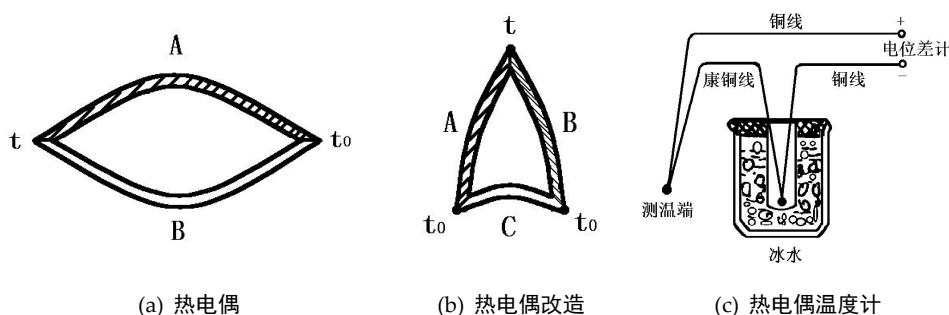


图 4: 热电偶温度计示意图

3.2.2 用平衡电桥测电阻的温度特性曲线

金属电阻温度计的原理是在温度不是很高的情况下可以忽略高阶小量,将金属的电阻随温度的变化看成是线性变化:

$$R_x = R_{x_0}(1 + \alpha t)$$

故而可以进行温度测量。

而半导体热敏温度计的原理是电阻随温度的变化具有指数关系:

$$R_T = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

其中 A 是与电阻器几何形状以及材料性质有关的常数而 B 是与材料半导体性质有关的常数,此外,这里的 T 是绝对温度。为了确定常数 A, B ,我们将上式化成对数并取两个固定的基点温度值,就得到了

$$A = R_{T_1} \exp\left(-\frac{B}{T_1}\right)$$

取对数后(统一单位制且对数值进行处理)便可以进行线性拟合,计算 A, B 。

3.2.3 设计非平衡电桥实现对热敏电阻的实时测量

非平衡电桥的电路图如下：

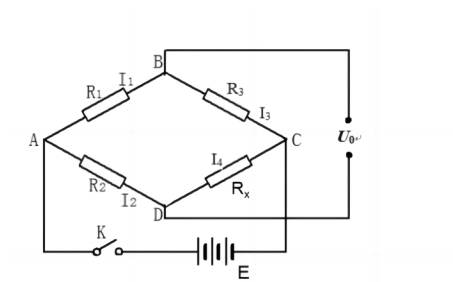


图 5: 非平衡电桥电路图

我们认为电压表内阻无穷大而忽略通过电压表的电流,这样就可以求出 U_0 :

$$U_0 = \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} + \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E$$

其中 $R_x = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$, 我们将其代入并进行 Taylor 级数展开, 忽略三阶以上的小量就得到了线性的关系式:

$$U_0 = \lambda + m(t - t_1)$$

其中,

$$\lambda = \left(\frac{B + 2T_1}{2B} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E \quad m = \left(\frac{4T_1^2 - B^2}{4BT_1^2} \right) E$$

这样就可以得到具体的表达式:

$$E = \left(\frac{4BT_1^2}{4T_1^2 - B^2} \right) m \quad R_2 = \frac{B - 2T}{B + 2T} R_{xT_1} \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{2BE}{(B + 2T_1)E - 2B\lambda} - 1$$

可以根据计算的 E , R_2 , R_1/R_3 设定非平衡电桥的参数, 将控温仪温度设在 40°C , 可微调 R_2 、 R_1 和 R_3 的阻值, 使电压表测得电压接近 -400 mV . 然后改变控温仪温度, 就可以检验测得的电压是否随温度线性变化, 换算之后的温度是否和设定的温度一致。

4 实验内容概要

注: 这里撰写一些基本和通用的操作。关于我自己具体的实验操作以及遇到的情况、处理方法等在“实验结果与数据处理”部分穿插叙述。

4.1 动态法测量铜棒和铝棒的导热率

(1) 实验前, 检查管路是否堵塞. 打开仪器盖, 仔细阅读注意事项. 两端冷却水管在两个样品中是串连的, 水流先走铝后走铜. (一般先测铜样品, 后测铝样品, 以免冷却水变热.)

(2) 打开水源, 从出水口观察流量, 要求水流稳定 (将阀门稍微打开即可).

——(i) (热端水流量较小时, 待测材料内温度较高; 水流较大时, 温度波动较大.) 因此热端水流要保持一个合适的流速, 阀门开至 $1/3$ 开度即可. 冷端水流量要求不高, 只要保持固定的室温即可. (ii) 调节水流: 保持电脑操作软件的数据显示曲线幅度和形状较好. (iii) 实际上不用冷端冷却水也能实验, 只是需要很长时间样品温度才能动态平衡. 而且环境温度变化会影响测量.

(3) 打开电源开关, 主机进入工作状态, 选择“程控”工作方式开始测量.

——(i)完成前述实验步骤,调节合适的水流量.因进水电磁阀初始为关闭状态,需要在测量开始后加热器停止加热的半周期内才调整和观察热端流速.(ii)打开操作软件.操作软件使用方法参见实验桌内的“实验指导”中“操作软件使用”部分说明.(iii)“平滑”功能尽量不要按,防止信号失真.

(4)在控制软件中设置热源周期 $T = 180\text{ s}$.选择铜样品进行测量.

——(i)设置 x, y 轴单位坐标. x 方向为时间,单位是秒, y 方向是信号强度,单位为毫伏(与温度对应).(ii)在“选择测量点”栏中选择一个或某几个测量点.(iii)按下“操作”栏中“测量”按钮,仪器开始测量工作,在电脑屏幕上画出 $T-t$ 曲线簇.40分钟后,系统进入动态平衡,样品内温度动态稳定.此时按下“暂停”,在“文件”菜单中选择保存,存储数据.

(5)换用铝样品,重复上几个步骤,继续测量.

(6)将实验数据通过网络发送给实验人供存储用.实验结束后,按顺序先关闭测量仪器,然后关闭自来水,最后关闭电脑.

总之,本实验的主要内容即打开水龙头,打开开关,点击两个按钮,收集数据即可.先后要对铜和铝测量热导率.

4.2 用电位差计测热电偶的温差电动势

(1)按照线路图连接线路,冷端放置在冰水混合物中,确保 $t = 0^\circ\text{C}$,热电偶端置于加热器中.

(2)调节电位差计,把倍率开关旋向需要的位置,检流计调零.

(3)将电键开关扳向“标准”,调节多圈变阻器,使检流计调零.

(4)将电键开关扳向“未知”,调节滑线盘,使检流计指零.其中 $E_x = (\text{步进盘读数} + \text{滑线盘读数}) \times \text{倍率}$

(5)在室温下测量电动势后开启温控仪电源,对热端加热,在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 区间内每隔 5°C 测定一组 (t, E_x) .

* 注意:热电偶不要接反、且需等温度稳定后进行读数测量.

4.3 用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的电阻值

(1)在室温下测得热敏电阻、铜电阻的电阻值.

(2)在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 区间内每隔 5°C 测定一组 (t, R_x) .

(3)后续处理数据时绘制图像并拟合得到铜电阻的系数 α 和热敏电阻的常数 A 和 B .

* 注意:温度升高较快,降低较慢.温控仪到达一个需要测量的温度点的时候,我们可以同时把热电偶电动势,铜和热敏电阻的电阻值都读出来,三个量同时测量,这样有利于实验更快完成.

4.4 用非平衡电桥制作热敏电阻温度计

(1)选定 $\lambda = -400\text{ mV}$, $m = -10\text{ mV}/^\circ\text{C}$, $t_1 = 40^\circ\text{C}$,并根据在 30°C , 50°C 下测得的热敏电阻大小计算 $E, R_2, \frac{R_1}{R_3}$.

(2)从而可设定非平衡电桥的参数,将温控仪温度设定为 40°C ,微调 R_2 阻值,使得电压表示数约 -400 mV .

(3)改变温控仪温度,在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 区间内,每隔 5°C 测得一组 U_0, t ,观察自制温度计测温的精度.