

准稳态测不良导体导热系数和比热

院 系: 自动化系

班 级: 自 02 班

学生姓名: 彭程

学 号: 2020011075

组 号: 单一晚 M

座 位 号: # 13

目录

| | |
|---------------------------------------|---|
| 1 实验名称 | 2 |
| 2 实验目的 | 2 |
| 3 实验原理 | 2 |
| 3.1 热传导 | 2 |
| 3.2 一阶导热模型 | 2 |
| 3.3 热传导方程及解 | 2 |
| 3.4 表面热流密度 q_c 的计算和温度差的测量 | 3 |
| 4 实验仪器 | 3 |
| 5 实验任务 | 3 |
| 5.1 实验步骤 | 3 |
| 6 数据处理 | 4 |
| 6.1 万用表的使用练习 | 4 |
| 6.2 热导实验准备、器件检查 | 4 |
| 6.3 温差电动势测量数据 | 5 |
| 7 实验总结 | 7 |
| 8 原始实验数据 | 8 |

1 实验名称

准稳态测不良导体的导热系数和比热

2 实验目的

1. 了解准稳态法测不良导体的导热系数和比热的原理，掌握其操作方法；
2. 掌握使用热电偶测量温度的方法；

3 实验原理

3.1 热传导

由傅里叶定律

$$Q = -\lambda F \frac{dt}{dx}$$

可导出

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

其中 q 为热流密度，比例系数 λ 为材料的导热系数（热导率），符号表示热流方向与温度梯度方向相反。

3.2 一阶导热模型

此次试验采用厚度为 $2R$ 的无限大平板模型进行热导率测量，从板的两端面进行功率相同的均匀热流加热，则板内温度分布以中心截面对称。

3.3 热传导方程及解

对应上述模型的一维导热方程：

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

初始条件：

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_0$$

边界条件：

$$\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R} = q_c, \quad \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$

式中 $0 < x < R$, $\tau > 0$, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ 为热扩散率, c 与 ρ 分别为材料的比热与密度。

利用分离变量法可以解出方程的解为：

$$t(x, \tau) - t_0 = \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{a\tau}{R} - \frac{R^2 - 3x^2}{6R} + R \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{R}\right) \exp(-\mu_n^2 F_0) \right]$$

式中 $\mu_n = n\pi, n = 1, 2, 3, \dots$

$F_0 = \frac{a\tau}{R^2}$ 为傅里叶数 (无量纲), t_0 为初始温度

经过一定时间, 当 $F_0 = \frac{a\tau}{R^2} > 0.5$ 时, 上式中的级数求和项变得很小, 可以化为:

$$t(x, \tau) - t_0 = \frac{q_c R}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{R^2} + \frac{x^2}{2R^2} - \frac{1}{6} \right)$$

这种状态叫做准稳态, 特点如下:

- (1) 样品表面和中心的温度差 $\Delta t = \frac{q_c R}{2\lambda}$ 保持恒定。
- (2) 样品中心升温速率 $\left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{x=0} = \frac{q_c a}{\lambda R} = \frac{q_c}{c\rho R}$ 保持恒定。

据此, 通过测出温度差与升温速率即可测量不良导体的热导率 λ 和热容 c 。

3.4 表面热流密度 q_c 的计算和温度差的测量

本实验中温差使用热电偶测量。当热电偶两端 T 和 T_0 温度不等时, 回路中近似产生温差电动势 $U = k(T - T_0)$ 。本实验中, $k = 40\mu V/^\circ C$

本实验中热源向两侧均匀散热, 故热流密度表达式为 $q_c = \frac{U^2}{2Fr}$, U 为薄膜加热电压, F 为薄膜面积, r 为单个加热器的电阻。

4 实验仪器

样品台装置:

平行板试样 4 块: 有机玻璃, 长宽 90mm, 厚度 10mm

薄膜加热器 2 片, 加热电压控制在 15 – 19.9 V 之间

热电偶 2 只

泡沫绝热体 2 块

函数信号发生器

数字万用表

直流稳压电源

保温杯 (冷端)

换向开关

秒表

电容、电阻、二极管

5 实验任务

5.1 实验步骤

(1) 阅读说明书并练习数字万用表的使用, 测量交流电压有效值及频率、交流信号频率、电阻值 (二端法)、电容及二极管正向导通电压;

(2) 完成样品台组装。打开直流稳压电源、数字万用表电源并预热一段时间, 在适当预设电压下, 用万用表测量实验前加热电压;

- (3) 用万用表测量并记录热电偶、加热器电阻值, 检查器件是否完好;
- (4) 连接热电偶、换向开关与数字万用表, 组装测温系统, 将热电偶各接点摆放到位;
- (5) 使用温度计测量初始温度 t_0 及初始温差 $U_1(t_2t_1)$ 、初始中心面温度 $U_2(t_1t_c)$ 。接通电源与加热器, 间隔 1 分钟测量 $U_1(t_2t_1)$ 与 $U_2(t_1t_c)$, 共测量约 25 分钟;
- (6) 断开电源并拆下万用表, 测量试验后的加热电压。进行数据处理。

6 数据处理

6.1 万用表的使用练习

| 测量任务 | 测量值 | 量程 | 精度 | 不确定度 | 完整测量结果 |
|---------|-------------------|--------------|------------|------------------|----------------------------------|
| 电阻 R | 10.8458 Ω | 20k Ω | 0.02+0.004 | 0.0030k Ω | (10.8458 \pm 0.0030)k Ω |
| 电容 C | 0.967 μ F | 2 μ F | 1+0.5 | 0.0020 μ F | (0.967 \pm 0.0020) μ F |
| 交流电压 U | 0.39372 V | 2 V | 0.2+0.05 | 0.0018 V | (0.3937 \pm 0.0018)V |
| 交流信号 f | 1000.00Hz | 20 Hz – 1kHz | 0.01+0.003 | 0.13Hz | (1000.00 \pm 0.13)Hz |
| 二极管导通电压 | 正向导通电压 = 0.5713 V | | | | |

不确定度计算:

(1) 电阻 R

$$\delta = 0.02\% \times 10.8458 + 0.004\% \times 20 = 0.0030\Omega$$

(2) 电容 C

$$\delta = 1\% \times 0.967 + 0.5\% \times 2 = 0.0020\mu F$$

(3) 交流电压 U

$$\delta = 0.2\% \times 0.39373 + 0.05\% \times 2 = 0.0018V$$

(4) 交流信号 f

$$\delta = 0.01\% \times 1000.00 + 0.003\% \times 1000 = 0.13Hz$$

6.2 热导实验准备、器件检查

1. 热电偶

| 中心面热电偶阻值 / Ω | 加热面热电偶阻值 / Ω | 中心面冷端热电偶阻值 / Ω | 加热面冷端热电偶阻值 / Ω |
|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 3.335 Ω | 2.556 Ω | 3.610 Ω | 3.658 Ω |

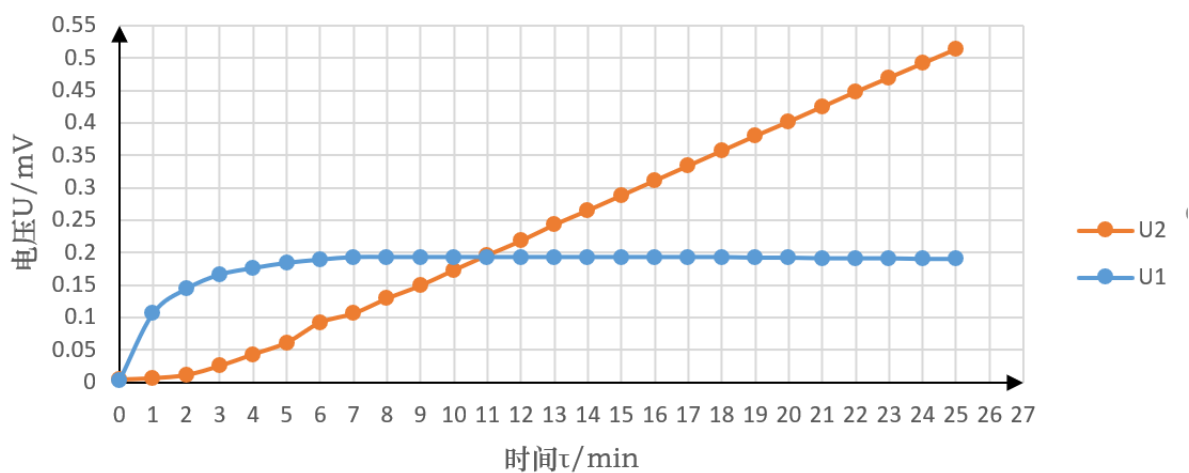
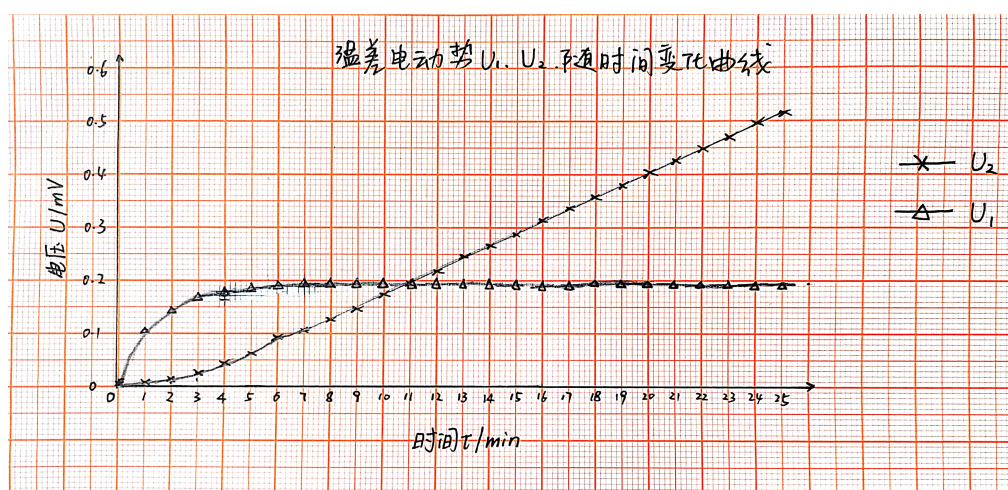
2. 加热薄膜并联阻值 = 55.200 Ω

3. 冷端水温 (室温) = 20.7 $^{\circ}$ C

4. 初始加热电压 = 17.9987 V, 结束加热电压 = 17.9988 V, 平均加热电压 = 17.9988V

6.3 温差电动势测量数据

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\tau(\text{min})$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 中心面 $U_2(t_1t_c)/\text{mV}$ | 0.004 | 0.006 | 0.011 | 0.025 | 0.043 | 0.061 | 0.092 | 0.106 | 0.129 |
| 加热面 $U_1(t_2t_1)/\text{mV}$ | 0.003 | 0.106 | 0.144 | 0.168 | 0.175 | 0.184 | 0.189 | 0.193 | 0.193 |
| $\tau(\text{min})$ | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 中心面 $U_2(t_1t_c)/\text{mV}$ | 0.149 | 0.173 | 0.196 | 0.218 | 0.243 | 0.265 | 0.288 | 0.311 | 0.334 |
| 加热面 $U_1(t_2t_1)/\text{mV}$ | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 |
| $\tau(\text{min})$ | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| 中心面 $U_2(t_1t_c)/\text{mV}$ | 0.357 | 0.380 | 0.402 | 0.425 | 0.448 | 0.470 | 0.492 | 0.514 | |
| 加热面 $U_1(t_2t_1)/\text{mV}$ | 0.193 | 0.192 | 0.192 | 0.191 | 0.191 | 0.191 | 0.190 | 0.190 | |

温差电动势 U_1 、 U_2 随时间变化曲线图 1: U_1 、 U_2 随时间变化曲线图 2: U_1 、 U_2 随时间变化曲线手绘图

从图线中可看出, 大约在第 7 min 后, $U_1(t_2, t_1)$ 加热面与中心面的温差不再发生变化, 可以认为进入准稳态状态。

在准稳态下, 计算加热面与中心面的温差:

$$\Delta t = \frac{U_1(t_2, t_1)}{k} = \frac{193\mu V}{40\mu V/^{\circ}C} = 4.825^{\circ}C$$

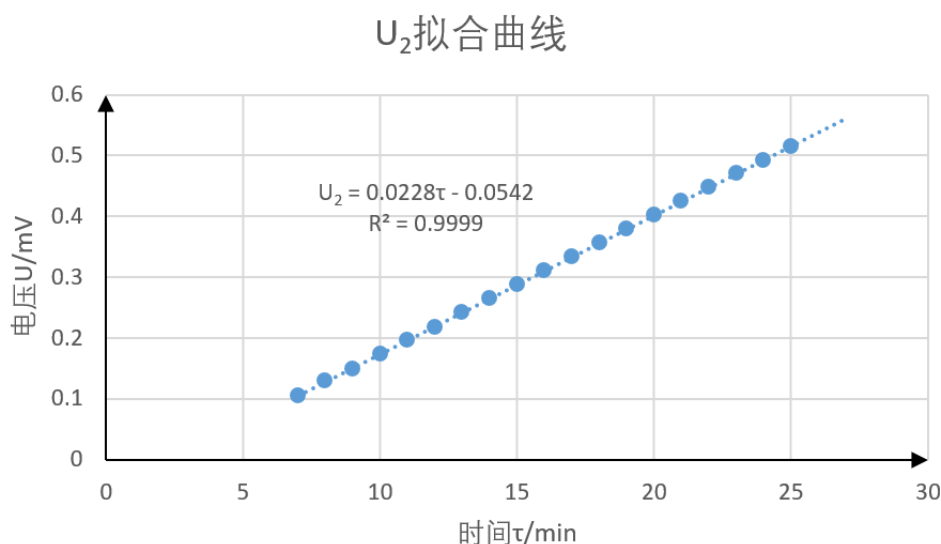
计算热流密度:

$$q_c = \frac{U^2}{2Fr} = \frac{17.9988^2}{2 \times 0.09^2 \times 2 \times 55.200} = 181.140 \text{ W/m}^2$$

因此, 导热系数 λ 计算结果为: (样品厚度 $R = 10 \text{ mm}$)

$$\lambda = \frac{q_c R}{2\Delta t} = \frac{181.14 \times 0.01}{2 \times 4.825} = 0.188 \text{ W/(m} \cdot K)$$

对 7min 后 U_2 的图像进行线性拟合, 拟合图像如下:



由线性拟合结果可得:

$$\frac{dU_2(t_1, t_c)}{d\tau} = 0.0228 \text{ mV/min}$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{k} \frac{dU_2}{d\tau} = 0.570^{\circ}C/\text{min} = 9.50 \times 10^{-3}^{\circ}C/s$$

因此, 比热 c 计算结果为: ($\rho = 1196 \text{ kg/m}^3, q_c = 181.37 \text{ W/m}^2$)

$$c = \frac{q_c}{\rho R \frac{dt}{d\tau}} = 1.594 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot K)$$

若认为 $\tau = 7 \text{ min}$ 时进入准稳态, 取 $U_2(t_1, t_c) = 0.106 \text{ mV}$ 温差 $t_1 t_c = \frac{U_2(t_1 t_c)}{k} = \frac{0.106}{0.04} = 2.65^{\circ}C$, 考虑到室温 $t_0 = t_c = 20.7^{\circ}C$, 故进入准稳态时, 中心面 $t_1 = 20.7 + 2.65 = 23.35^{\circ}C$

样品内各点温升速率相同且恒定, 任意两点之间温差不随时间改变, 故加热面与中心面温差不变, $U_1(t_2, t_1)$ 保持稳定。根据理论分析, 中心面的温升速率 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{q_c}{c\rho R}$ 保持不变, 故 $U_2(t_1, t_c)$ 与 τ 呈线性关系。

若将热流密度按照电功率的 85 % 修正, 则:

$$q_c = 85\% \cdot \frac{U^2}{2Fr} = 153.97W/m^2$$
$$\lambda = \frac{q_c R}{2\Delta t} = 0.160W/(m \cdot K)$$
$$c = \frac{q_c}{\rho R \frac{dt}{d\tau}} = 1.355 \times 10^3 J/(kg \cdot K)$$

7 实验总结

通过本次实验, 我学会了准稳态法测不良导体的导热系数和比热, 明白了其背后原理, 实践了其操作方法, 对于稳态、准稳态、瞬时测导热系数的原理方法有了较为全面的认识。同时还掌握了热电偶测量温度的原理和接线方法。

由于之前的实验经历和专业上电子实验较多, 所以对信号发生器和万用表较为熟悉, 所以总体而言本次试验完成的比较顺利, 没有遇到太多困难。唯一的问题就是实验前对导热的设备不是太熟悉, 导致在接线上出现了一些错误, 不过后来及时改正了错误。以后的实验中, 需要对仪器设备、测量原理等充分熟悉。科学实验离不开严谨, 这应是贯穿操作始终的。

这是本学期最后一次物理实验, 在这门课上我收获了很多, 最后感谢助教的悉心指导!

(原始记录见尾页)

8 原始实验数据

王唯茹
12.06

准稳态法测量不良导体的导热系数和比热

班级 自02 姓名 彭程 学号 2020011075 组号 单-晚M 座位号 113

零、万用表使用练习:

| 测量任务 | 测量值 | 万用表量程 | 不确定度计算公式及计算结果 | 完整测量结果 |
|----------|--------------------|---------------|---|---------------------------------|
| 电阻 R | 10.8458 k Ω | 20 k Ω | $0.020\% \times 10.8458 + 0.004\% \times 20 = 0.0030$ | 10.8458 ± 0.0030 k Ω |
| 电容 C | 0.967 μ F | 2 μ F | $1\% \times 0.967 + 0.5\% \times 2 = 0.020$ | 0.967 ± 0.020 μ F |
| 交流电压 U | 0.39373 V | 2 V | $0.2\% \times 0.39373 + 0.05\% \times 2 = 0.0018$ | 0.3937 ± 0.0018 V |
| 交流信号 f | 1000.00 Hz | 1 kHz | $0.01\% \times 1000 + 0.003\% \times 1000 = 0.13$ | 1000.00 ± 0.13 Hz |
| 二极管导通电压 | 二极管正向导通电压 0.5713 V | | | |

一、热导实验准备、器件检查:

1、接线前检测热电偶是否完好:

中心面热电偶阻值=3.335 Ω 应小于 10 Ω)加热面热电偶阻值=2.556 Ω 应小于 10 Ω)中心面冷端热电偶阻值=3.610 Ω 应小于 10 Ω)加热面冷端热电偶阻值=3.658 Ω 应小于 10 Ω)2、两个相同电加热薄膜并联后的阻值=55.200 Ω 3、冷端水温 (近似以室温替代) $t_c = 20.7^\circ\text{C}$

4、直流电源设定加热电压 (15~20V), 并测量 (加热前后各测一次): 17.9987V (加热前), 17.9988 (加热后)

二、实验接线, 通电前记录 $\tau=0$ 时的数据 (U_1 应小于 10 微伏), 通电加热起开始计时、按时记录数据: 单位: mV

| τ (分钟) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_2(t_1, t_c)$ | 0.004 | 0.006 | 0.011 | 0.025 | 0.043 | 0.061 | 0.092 | 0.106 | 0.129 |
| $U_1(t_2, t_1)$ | 0.003 | 0.106 | 0.144 | 0.168 | 0.175 | 0.184 | 0.189 | 0.193 | 0.193 |
| τ (分钟) | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| $U_2(t_1, t_c)$ | 0.149 | 0.173 | 0.196 | 0.218 | 0.243 | 0.265 | 0.288 | 0.311 | 0.334 |
| $U_1(t_2, t_1)$ | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.193 |
| τ (分钟) | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| $U_2(t_1, t_c)$ | 0.357 | 0.380 | 0.402 | 0.425 | 0.448 | 0.470 | 0.492 | 0.514 | |
| $U_1(t_2, t_1)$ | 0.193 | 0.192 | 0.192 | 0.191 | 0.191 | 0.191 | 0.190 | 0.190 | |