

准稳态法测不良导体的导热系数和比热-实验报告

姓名：夏弘宇 学号：2023011004 实验日期：20241008 实验组/台号：M11

【实验目的】

- 1.学习万用表的功能及其使用方法；
- 2.了解使用热电偶测量温度的方法。
- 3.学习并掌握准稳态法测量不良导体的导热系数和比热的原理和方法；
- 4.学习作图法处理实验数据。

【实验仪器】

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（手机秒表代替）、未知规格电容、电阻、二极管、导线

实验样品台架：①中心面横梁，承载中心面的热电偶；②加热面横梁，承载加热面的热电偶；③加热薄膜，给样品加热，两加热薄膜已并联；④隔热泡沫层，防止散热，从而保证实验精度；⑤锁定杆，实验时锁定横梁，防止在未松开螺杆⑥时取出热电偶导致热电偶损坏；⑥螺杆旋钮，推动隔热层压紧或松开实验样品和热电偶。

平行板试样 4 块：有机玻璃，密度 1196kg/m^3 ，长 \times 宽 \times 厚= $90.0\text{mm}\times 90.0\text{mm}\times 10.0\text{mm}$ ；薄膜加热器 2 片，加热电压控制在 $15-20\text{V}$ 之间，电流不超过 0.5A ；热电偶 2 只，温度系数 $40.0\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ；泡沫绝热体 2 块

【实验原理】

1. 傅里叶导热定律

单位时间内通过该截面的传导热量 $Q = -\lambda F \frac{dt}{dx}$

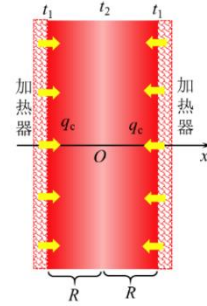
单位时间内通过单位面积的热流量为热流密度（也称为热通量）

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

2. 准稳态法测量导热系数及比热

目标：测量不良导体样品的导热系数 λ

模型：厚度为 $2R$ ，初始内部温度均匀为 t_0 ，在两侧提供恒定热流密度 q_c ，平板样品内温度场记作 $t(x, \tau)$ ，以中心截面 $x=0$



为对称面；沿 x 轴方向的传热方程为 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ ， $|x| \leq R$ ，

其中热扩散率 $\alpha = \lambda / (c\rho)$ ，考虑初始及边界条件，易得

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

式中 $\mu_n = n\pi$ ， $n=1, 2, 3, \dots$ ， $F_0 = \alpha \tau / R^2$ 为傅里叶数。当经过一定的初始加热时间 τ 使得傅里叶数 $F_0 > 0.5$ 后，式中指数项因子衰减得很小，可以忽略，因此简化为

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

由此表达式可以看出， $F_0 > 0.5$ 后任一时刻样品内各点的温度 t 随位置 x 的变化呈抛物线分布；任意一点的温度随加热时间 τ 的增加而线性升高。进一步分析可知，样品内各点的温升速率相同并保持不变（准稳态）。

虽然上述各式都预设样品表面无限大，但实际只要长宽为厚度的6倍就可以近似认为样品中心点就位于无限大平板上，忽略有限面积带来的误差。

上式中有 c 和 λ 两个未知量，所以还需要一个式子来测 c 。由于装置的对称性，样品中心面为绝热面，从一侧的加热面流入样品的热流 q_c 全部被 $R \sim 0$ 厚度范围内的样品物质所吸收，使得样品内各处的温度以相同的速率 $dt/d\tau$ 同步升高

（ $F_0 > 0.5$ 后），因此符合 $q_c F = c \rho R F \frac{dt}{d\tau}$ ，即 $c = \frac{q_c}{\rho R} \left(\frac{dt}{d\tau} \right)^{-1}$ 。

3. 热电偶测温

本实验中，由于温差较小，可近似为 $U(t, t_0) = k_1(t - t_0)$ ， k_1 为热电偶常数。

4. 热流密度 q_c 的计算

$$q_c = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{加热}}^2}{rF}$$

【实验内容及步骤】

1. 学习数字万用表的基本使用

测量电阻阻值（二端法测量）、电容、二极管的正向导通电压、交流信号的电压、频率。注意计算仪器误差： $\Delta_{\text{仪}} = \alpha\% \cdot \text{读数} + \beta\% \cdot \text{量程}$ 。

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. 连接电路

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. 数据测量与记录

使用温度计测量初始温度 t_0 及初始温差 $U_1(t_2 t_1)$ 、初始中心面温度 $U_2(t_1 t_c)$ 。接通电源与加热器，间隔 1 分钟测量 $U_1(t_2 t_1)$ 与 $U_2(t_1 t_c)$ ，共测量约 25 分钟。

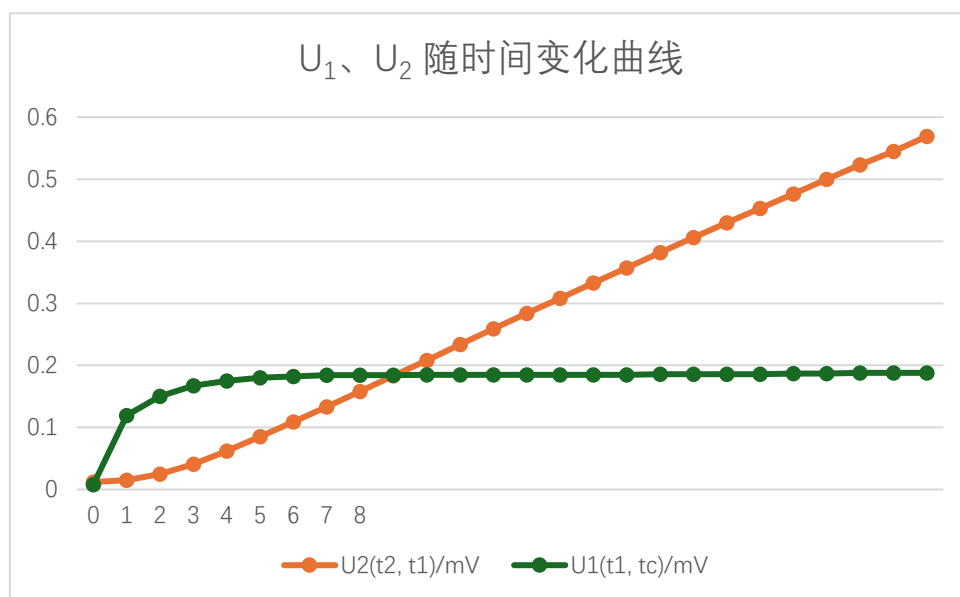
6. 结束实验

断开电源并拆下万用表，测量试验后的加热电压。清理实验台，注意松开压住式样的螺杆进行散热。

【数据处理】

$\tau(\text{分钟})$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_2(t_2, t_1)/\text{mV}$	0.012	0.015	0.025	0.041	0.062	0.085	0.109	0.133	0.158
$U_1(t_1, t_c)/\text{mV}$	0.008	0.119	0.150	0.167	0.175	0.180	0.182	0.184	0.184
$\tau(\text{分钟})$	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$U_2(t_2, t_1)$	0.183	0.208	0.234	0.259	0.284	0.308	0.333	0.357	0.382
$U_1(t_1, t_c)$	0.184	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.186
$\tau(\text{分钟})$	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$U_2(t_2, t_1)$	0.406	0.430	0.453	0.476	0.500	0.523	0.545	0.569	
$U_1(t_1, t_c)$	0.186	0.186	0.186	0.187	0.187	0.188	0.188	0.188	

其余数据见原始数据记录。



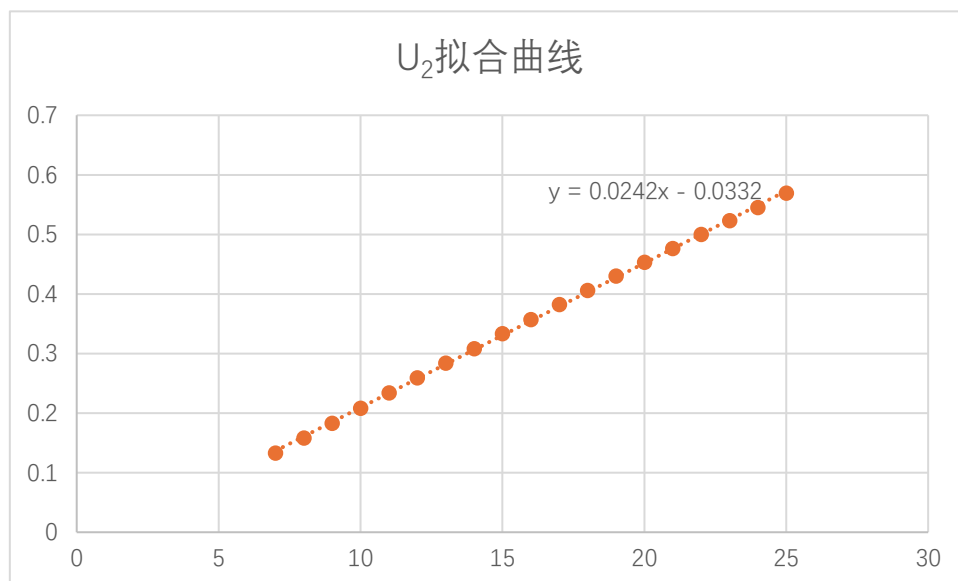
从图线中可看出，在第 7 min 后，加热面与中心面的温差不再发生变化，可以认为进入准稳态状态。

在准稳态下，计算加热面与中心面的温差 $\Delta t = \frac{U_1}{k} = \frac{186\mu\text{V}}{40\mu\text{V}/^\circ\text{C}} = 4.65^\circ\text{C}$ 。

计算热流密度 $q_c = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{加热}}^2}{rF} = \frac{17.9830^2}{2 \times 0.09^2 \times 2 \times 55.226} = 180.732\text{W}/\text{m}^2$ 。

于是，导热系数 $\lambda = \frac{q_c R}{2\Delta t} = \frac{180.732 \times 0.01}{2 \times 4.65} = 0.194\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$

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：

$$\frac{dU_2}{d\tau} = 0.0242 \text{ mV/min}$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{k} \frac{dU_2}{d\tau} = \frac{1}{40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}} \times 0.0242 \text{ mV/min} = 0.605^\circ\text{C/min}$$

计算样品材料比热容得：

$$c = \frac{q_c}{\rho R} \left(\frac{dt}{d\tau} \right)^{-1} = \frac{180.732 \text{ W/m}^2}{1196 \text{ kg/m}^3 \times 10 \times 10^{-3} \text{ m}} \times \left(\frac{60}{0.605} \right) \text{ s}/^\circ\text{C} = 1.50 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

【实验总结】

实验结果： $\lambda = 0.194 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ， $c = 1.50 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$

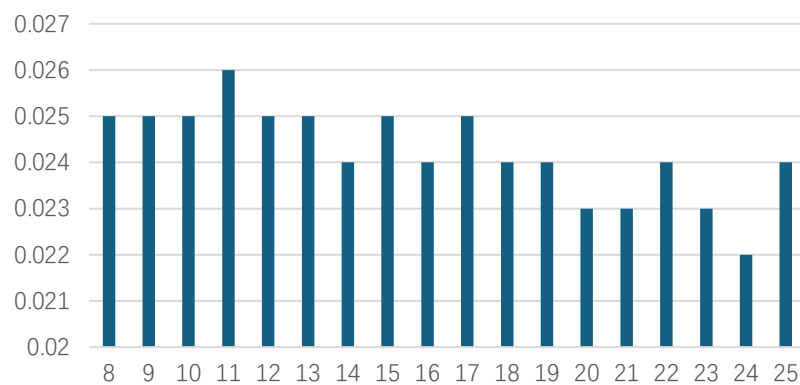
测量误差：

系统误差：由于热量耗散的存在，测得的温度都会偏低；将有限大平板视为无限大平板存在误差。

偶然误差：万用表测量读数产生的误差。

其中，热量耗散是简易热学实验难以避免的系统误差，从读数中也可以看出，7min 之后， ΔU_2 总体变化越来越小，与保持不变的理想状况不符合，主要就是因为热量的耗散。鉴于这一因素，本实验分析过程中并未计算不确定度。

ΔU_2 随时间变化的情况



【原始数据记录】

准稳态法测量不良导体的导热系数和比热数据记录

姓名: 夏弘宇 学号 202301004 实验组号: M 实验台号: 11 实验日期: 20241008

1. 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	<u>11.0445kΩ</u>	<u>20kΩ</u>	$11.0445 \times 0.020\% + 20 \times 0.004\% = 0.0030$	<u>$11.0445 \pm 0.0030 k\Omega$</u>
电容 C	<u>0.940μF</u>	<u>2μF</u>	$0.940 \times 1\% + 2 \times 0.5\% = 0.020$	<u>$0.940 \pm 0.020 \mu F$</u>
交流电压 U	<u>1.7430V</u>	<u>2V</u>	$1.7430 \times 0.6\% + 2 \times 0.05\% = 0.011$	<u>$1.743 \pm 0.011 V$</u>
交流信号 f	<u>49.987Hz</u>	<u>49.987Hz</u>	$49.987 \times 0.01\% + 49.987 \times 0.005\% = 0.005$ 频率测量时量程取测量结果所在区间上限	<u>$49.9870 \pm 0.006 Hz$</u>
二极管导通电压	<u>0.5744V</u>		(不需要估计不确定度)	

2. 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 = 3.673 Ω (应小于 10 欧)
- 加热面热电偶阻值 = 3.283 Ω (应小于 10 欧)
- 中心面冷端热电偶阻值 = 3.815 Ω (应小于 10 欧)
- 加热面冷端热电偶阻值 = 3.943 Ω (应小于 10 欧)

(2) 两个相同电加热薄膜并联后的阻值 = 55.226 Ω

(3) 冷端水温 (近似以室温替代) $t_c =$ 23.5 $^{\circ}C$

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

$$U(\text{前}) = \underline{17.9826} V, \quad U(\text{后}) = \underline{17.9834} V$$

(5) 其他已知条件: 有机玻璃样品密度 1196 kg/m³, 几何尺寸 90.0 \times 90.0 \times 10.0 mm³

热电偶 (铜-康铜) 温度系数 = 40.0 $\mu V/^{\circ}C$

3. 加热测量 ($\tau=0$ 时 U_1 应小于 10 微伏)

τ (分钟)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_2(t_2, t_1)/(mV)$	0.012	0.015	0.025	0.041	0.062	0.085	0.109	0.133	0.158
$U_1(t_1, t_c)/(mV)$	0.008	0.119	0.150	0.167	0.175	0.180	0.182	0.184	0.184
τ (分钟)	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$U_2(t_2, t_1)$	0.183	0.208	0.234	0.259	0.284	0.308	0.333	0.357	0.382
$U_1(t_1, t_c)$	0.184	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.186
τ (分钟)	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$U_2(t_2, t_1)$	0.406	0.430	0.453	0.476	0.500	0.523	0.545	0.569	
$U_1(t_1, t_c)$	0.186	0.186	0.186	0.187	0.187	0.188	0.188	0.188	

顾天来
10.08