



北京航空航天大学 实验报告

实验名称: 稳态法测不良导体热导率

一、实验目的.

1. 了解不良导体热导率的测量方法.
2. 熟悉稳态法实验中各仪器的使用方法.
3. 了解傅里叶热传导方程式

二、实验原理.

选用FD-TC-B型导热系数测定仪, 由傅里叶导热方程式 $\frac{\partial Q}{\partial t} = kS \frac{\theta_1 - \theta_2}{h}$, 可得 $\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{k\pi d^2}{4} \frac{\theta_1 - \theta_2}{h_b}$, d 为样品直径, h_b 为厚度, 当传热达到稳定状态时, θ_1 和 θ_2 值不变. 这时通过将B盘移去, 使铜加热盘C的底面与P盘直接接触. 再移开加热盘C, 让P自然冷却, 观测 θ 随 t 变化情况, 由此求出P在 θ_2 的冷却速率 $\left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|_{\theta=\theta_2}$, 而 $m_p c \left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|_{\theta=\theta_2}$ 即为铜盘在 θ_2 时散热速率, 但这时的 $\left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|_{\theta=\theta_2}$ 是P全表面于空气中的冷却速度, 表面积为 $\frac{1}{2}\pi d_p^2 + \pi d_p h_p$, 而在样品稳态传热时, 上表面 $\frac{1}{4}\pi d_p^2$ 被样品覆盖, 应修正 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = m_p c \frac{\partial \theta}{\partial t} \frac{\frac{1}{2}\pi d_p^2 + \pi d_p h_p}{\frac{1}{4}\pi d_p^2 + \pi d_p h_p}$.
即 $k = m_p c \frac{\partial \theta}{\partial t} \frac{d_p + 4h_p}{d_p + 2h_p} \cdot \frac{h_b}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \frac{2}{\pi d_p^2}$.

其中 d_p : 圆铜盘的直径. h_p : 圆铜盘的厚度. m_p : 圆铜盘的质量

c : 圆铜盘的比热容. θ_1, θ_2 : 两平行平面温度. h_b : 样品厚度.

d_b : 样品直径.

且 d_p, h_p, h_b, d_b 均由游标卡尺多次测量取平均值所得;

θ_1, θ_2 由电势差测得;

t 由秒表计时测得;

m_p 由电子天平多次测量取平均值所得.

三. 实验仪器.

FD-TC-B 导热系数测定仪、游标卡尺、电子天平

四. 实验步骤.

1. 取下固定螺钉, 将样品放在加热盘与散热盘之间, 橡胶样品要求与加热盘、散热盘完全对准, 调节微调螺钉确保接触良好, 不宜过紧或过松.
2. 插好电源, 将两根连线一端连接机壳, 一端插在加热盘与散热盘的小孔中, 并在传感器上抹一些硅油或导热硅脂以确保接触良好.
3. 接上测定仪的电源, 开启后左表头显示 FDHC, 然后为当时温度. 当转换至 $b=...$ 时可设定控制温度, 后按确定键加热盘开始加热, 右边显示盘的实时温度.
4. 加热盘温度上升至设定温度时开始记录散热盘温度. 可每隔 1 min 记录一次, 如 10 min 或更长时间 θ_1 与 θ_2 基本不变, 可认为达到稳态.
5. 按复位键停止加热, 取走样品, 调节螺钉使盘间接触良好, 再设温度为 78°C , 加快散热盘温度上升, 使散热盘温度升至高于稳态 θ_2 约 20°C .
6. 移去加热盘, 让散热盘在风扇作用下冷却, 每隔 15s (或 30s) 记录一次散热盘温度. 由临近 θ_2 的数据计算冷却速度.
7. 根据所测稳态的 θ_1 和 θ_2 以及在 θ_2 时的冷却速率求出导热系数.

五. ~~数据处理~~ 预习思考题

8. 测 m, h, d

— |

1. 傅里叶导热方程成立的条件:

- (1). 导热介质是均质的.
- (2). 热传导介质是各向同性的.
- (3). 热源在介质中的分布是均匀的.
- (4). 热传导介质的物理参数是不随时间变化的.
- (5). 系统处于稳态.



北京航空航天大学 实验报告

实验名称: 稳态法测不良导体热导率

2. 如何判断系统已达到稳态.

若在10min或更长的时间内加热盘和散热盘的温度值(θ_1 和 θ_2)基本不变, 则可以认为达到了稳态.

六. 数据处理.

(一) 原始数据.

1. 相关参数测量记录表.

	1	2	3	4	5	平均.
m/g	1133.41	1133.42	1133.40	1133.36	1133.40	1133.398
d_p/mm	130.08	130.10	130.06	130.10	130.06	130.08
h_p/mm	10.10	9.98	10.06	10.08	10.00	10.044
h_b/mm	8.64	8.70	8.66	8.58	8.66	8.648
d_b/mm	129.70	129.72	129.70	129.68	129.70	129.70

2. 找稳态过程数据记录表.

时间 t/min .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
加热盘温度 $\theta_1/^\circ C$.	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9
散热盘温度 $\theta_2/^\circ C$.	50.8	51.0	51.3	51.5	51.6	51.7	51.8	51.9	52.0	52.0

时间 t/min .	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
加热盘温度 $\theta_1/^\circ C$.	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9
散热盘温度 $\theta_2/^\circ C$.	52.0	52.0	52.0	52.0	52.1	52.0	52.1	52.0	52.0	52.0

3. 散热盘冷却速率数据记录表.

时间 t/s	0	15	30	45	60	75	90	105	120
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$	68.0	67.3	66.87	66.5.8	64.9	63.9	62.9	62.1	61.1
时间 t/s	135	150	165	180	195	210	225	240	255
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$	60.1	59.3	58.5	57.6	56.8	56.1	55.3	54.6	53.9
时间 t/s	270	285	300	315	330	345	360	375	390
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$	53.2	52.5	51.8	51.2	50.6	50.0	49.4	48.8	48.1
时间 t/s	405	420	435	450	465	480	495	510	525
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$	47.6	47.1	46.6	46.1	45.5	45.0	44.5	44.0	43.6
时间 t/s	540	555	570	585	600				
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$	43.2	42.8	42.3	41.9	41.5				

(二). 数据处理.

1. 相关参量的确定.

由原始数据表格, $d_p = 130.08 \text{ mm}$ $h_p = 10.044 \text{ mm}$ $m_p = 1133.3989 \text{ g}$

$d_b = 129.70 \text{ mm}$ $h_b = 8.648 \text{ mm}$

又有已知数据, 铜盘的比热容 $c = 389 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$.

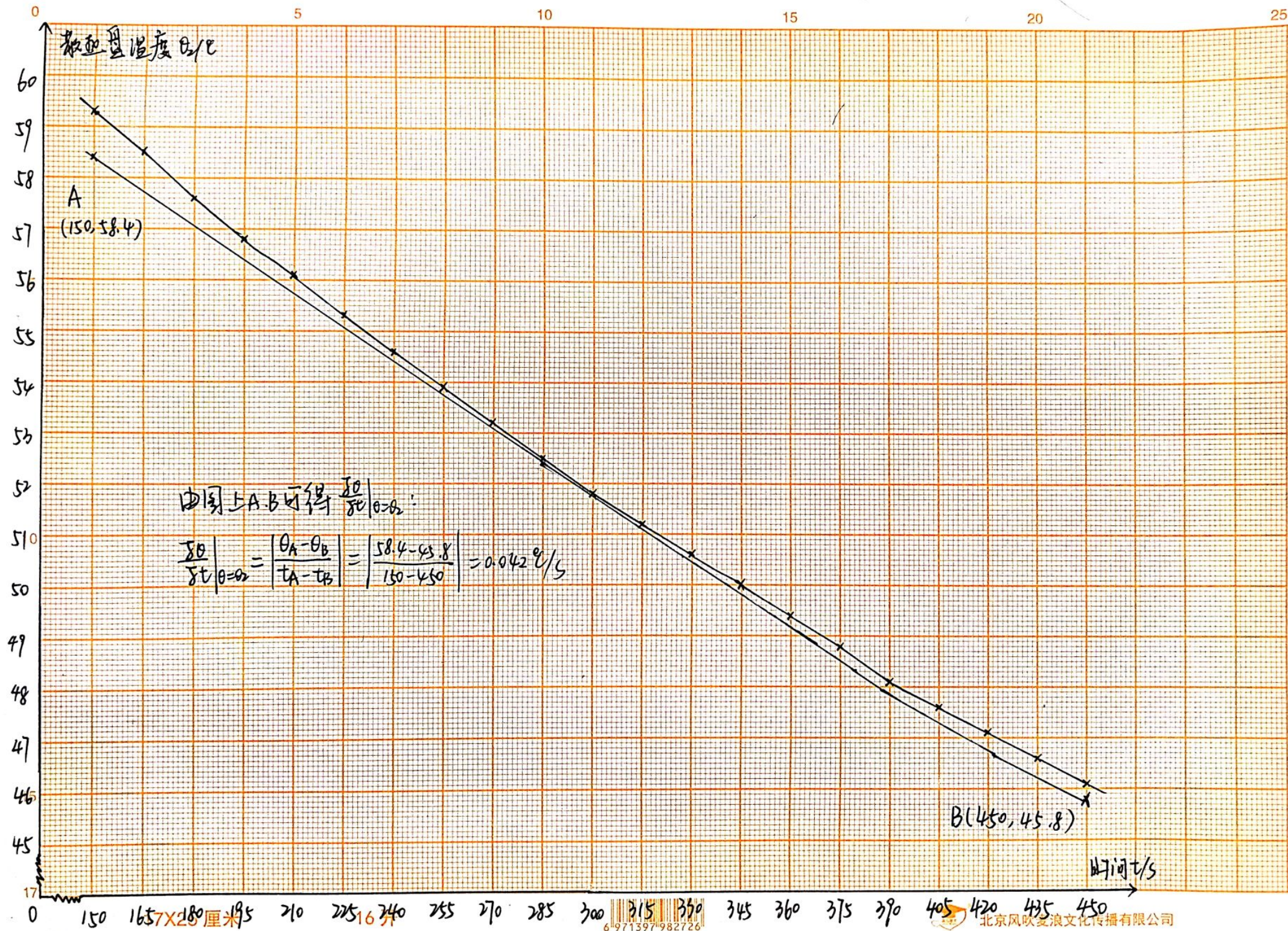
由稳态过程记录表, 散热盘稳态温度 $\theta_2 = 52.0^\circ\text{C}$. 加热水 $\theta_1 = 78.9^\circ\text{C}$

2. 作图法求散热盘温度 $\theta = \theta_2$ 时的冷却速率 $\left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{\theta=\theta_2}$

选取 $\theta_2 = 52.0^\circ\text{C}$ 上下各10个数据点. 即 (150, 59.3), (165, 58.5), (180, 57.6), (195, 56.8)

(210, 56.1), (225, 55.3), (240, 54.6), (255, 53.9), (270, 53.2), (285, 52.5), (300, 51.8), (315, 51.2)

(330, 50.6), (345, 50.0), (360, 49.4), (375, 48.8), (390, 48.1), (405, 47.6), (420, 47.1), (435, 46.6)





北京航空航天大学 实验报告

实验名称: 稳态法测不良导体热导率

根据所作图像, 选取 (150, 58.4) 与 (450, 45.8) 两点, 求得斜率即为

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|_{\theta=\theta_2} = \left| \frac{58.4 - 45.8}{150 - 450} \right| = 0.042 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

3. 计算热导率 k .

$$k = m_p C \left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|_{\theta=\theta_2} \frac{d_p + 4h_p}{d_p + 2h_p} \cdot \frac{h_b}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \frac{2}{\pi d_b^2} = 1133.398 \times$$

$$= 1133.398 \times 10^{-3} \times 389 \times 0.042 \times \frac{130.08 + 4 \times 10.044}{130.08 + 2 \times 10.044} \times \frac{8.648 \times 10^{-3}}{77.9 - 52.0} \times \frac{2}{3.14159 \times (129.70 \times 10^{-3})^2}$$

$$= 0.26529 \text{ (W/(m}\cdot\text{K))}$$

4. 计算不确定度.

(1). 相关量 A 类不确定度.

$$U_A(m_p) = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(133.41 - 1133.398)^2 + \dots}{5 \times 4}} = 1.0198 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$U_A(d_p) = \sqrt{\frac{\sum (d_{pi} - \bar{d}_p)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(130.08 - 130.08)^2 + \dots}{5 \times 4}} = 8.9443 \times 10^{-6} \text{ m.}$$

$$U_A(h_p) = \sqrt{\frac{\sum (h_{pi} - \bar{h}_p)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(10.10 - 10.044)^2 + \dots}{5 \times 4}} = 2.3152 \times 10^{-5} \text{ m.}$$

$$U_A(h_b) = \sqrt{\frac{\sum (h_{bi} - \bar{h}_b)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(8.64 - 8.648)^2 + \dots}{5 \times 4}} = 1.9596 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$U_A(d_b) = \sqrt{\frac{\sum (d_{bi} - \bar{d}_b)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(129.70 - 129.70)^2 + \dots}{5 \times 4}} = 6.3246 \times 10^{-6} \text{ m}$$

(2). 相关量 B 类不确定度.

$$U_B(m_p) = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \times 10^{-3} = 5.7735 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$U_B(d_p) = U_B(h_p) = U_B(h_b) = U_B(d_b) = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} \times 10^{-3} = 1.1547 \times 10^{-5} \text{ m.}$$

$$U_B(\Delta \theta) = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 2.8868 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C.}$$

$$U_b(\Delta t) = \frac{\Delta R}{\sqrt{3}} = \frac{0.75}{\sqrt{3}} = 0.433015$$

$$U_b(\theta_1 - \theta_2) = \frac{\Delta R}{\sqrt{3}} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 5.7735 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ$$

(3). 相关量不确定度的合成.

$$U(mp) = \sqrt{U_a^2(mp) + U_b^2(mp)} = \sqrt{(1.0198 \times 10^{-5})^2 + (5.7735 \times 10^{-6})^2} = 1.1719 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$U(dp) = \sqrt{U_a^2(dp) + U_b^2(dp)} = \sqrt{(8.9443 \times 10^{-6})^2 + (1.1547 \times 10^{-5})^2} = 1.4606 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$U(hp) = \sqrt{U_a^2(hp) + U_b^2(hp)} = \sqrt{(2.3152 \times 10^{-5})^2 + (1.1547 \times 10^{-5})^2} = 2.5872 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$U(hb) = \sqrt{U_a^2(hb) + U_b^2(hb)} = \sqrt{(1.9596 \times 10^{-5})^2 + (1.1547 \times 10^{-5})^2} = 2.2745 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$U(db) = \sqrt{U_a^2(db) + U_b^2(db)} = \sqrt{(6.3246 \times 10^{-5})^2 + (1.1547 \times 10^{-5})^2} = 6.4291 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$U(\Delta \theta) = U_b(\Delta \theta) = 2.8868 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ$$

$$U(\Delta t) = U_b(\Delta t) = 0.433015$$

$$U(\theta_1 - \theta_2) = U_b(\theta_1 - \theta_2) = 5.7735 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ$$

(4). 合成 k 的不确定度.

$$\text{设 } k = mp \cdot C \cdot \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \cdot L_p \cdot L_b, \quad L_p = \frac{dp + 4hp}{dp + 2hp}, \quad L_b = \frac{hb}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \frac{2}{\pi db^2}, \quad \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\delta \theta}{\delta t} \Big|_{\theta = \theta_2}$$

$$\frac{U(\frac{\Delta \theta}{\Delta t})}{\frac{\Delta \theta}{\Delta t}} = \sqrt{\left[\frac{U(\delta \theta)}{\delta \theta}\right]^2 + \left[\frac{U(\delta t)}{\delta t}\right]^2} = \sqrt{\left(\frac{2.8868 \times 10^{-2}}{58.4 - 45.8}\right)^2 + \left(\frac{0.433015}{450 - 150}\right)^2} = 2.7079 \times 10^{-3}$$

$$\frac{U(mp)}{mp} = \frac{1.1719 \times 10^{-5}}{1133.398 \times 10^{-3}} = 1.0340 \times 10^{-5}$$

$$\begin{aligned} \frac{U(L_p)}{L_p} &= \frac{2 \sqrt{h_p^2 U^2(dp) + dp^2 U^2(hp)}}{(dp + 4hp)(dp + 2hp)} = \frac{2 \sqrt{(10.044 \times 10^{-3})^2 \times (1.4606 \times 10^{-5})^2 + (130.08 \times 10^{-3})^2 \times (2.5872 \times 10^{-5})^2}}{(130.08 + 4 \times 10.044) \times 10^{-3} \times (130.08 + 2 \times 10.044) \times 10^{-3}} \\ &= 2.6351 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{U(L_b)}{L_b} &= \sqrt{\left[\frac{U(hb)}{hb}\right]^2 + 4 \left[\frac{U(db)}{db}\right]^2 + \left[\frac{U(\theta_1 - \theta_2)}{\theta_1 - \theta_2}\right]^2} = \sqrt{\left(\frac{2.2745 \times 10^{-5}}{8.648 \times 10^{-3}}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{6.4291 \times 10^{-5}}{129.7 \times 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{5.7735 \times 10^{-2}}{77.9 - 52.0}\right)^2} \\ &= 3.5874 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{U(k)}{k} &= \sqrt{\left[\frac{U(mp)}{mp}\right]^2 + \left[\frac{U(\frac{\Delta \theta}{\Delta t})}{\frac{\Delta \theta}{\Delta t}}\right]^2 + \left[\frac{U(L_p)}{L_p}\right]^2 + \left[\frac{U(L_b)}{L_b}\right]^2} = \sqrt{(1.0340 \times 10^{-5})^2 + (2.7079 \times 10^{-3})^2 + (2.6351 \times 10^{-4})^2 + (3.5874 \times 10^{-3})^2} \\ &= 3.5967 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$U(k) = \frac{U(k)}{k} \cdot k = 3.5967 \times 10^{-3} \times 0.26329 = 9.5417 \times 10^{-4} \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$$



北京航空航天大学

实验报告

实验名称: 稳态法测不良导体的热导率

(三) 实验结果表述

待测不良导体的热导率 $k \pm u(k) = (0.265 \pm 0.001) \text{ W/m}\cdot\text{K}$

(四) 误差分析.

本次实验在测量数据时, 主要误差来源于记录冷却时数据时, 无法稳定地同时对时间和温度进行实时读数, 易出现数据延时, 且在绘图时也会产生误差.

七. 课后思考题.

1. 不确定度表达式: $k = m_p \cdot C \cdot \frac{\delta \theta}{\delta t} \cdot \frac{d_p + 4h_p}{d_p + 2h_p} \cdot \frac{h_B}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \frac{2}{\pi d_B^2} = m_p \cdot C \cdot \frac{\delta \theta}{\delta t} \cdot d_p \cdot d_B$

可得 $u(k) = \sqrt{\left[\frac{u(m_p)}{m_p}\right]^2 + \left[\frac{u(\frac{\delta \theta}{\delta t})}{\frac{\delta \theta}{\delta t}}\right]^2 + \left[\frac{u(d_p)}{d_p}\right]^2 + \left[\frac{u(d_B)}{d_B}\right]^2}$

误差主要来自 $(\theta_1 - \theta_2)$, 胶木板导热率小, 上下温度变化幅度大, 由于 A、B、P 均质地硬, 故中间必然存在空气层, 且温度由热电偶与数字万用表传感器所测, 故 $\theta_1 - \theta_2$ 误差大, 计算影响较大.

2. 若胶热板与加热板之间存在空气层, 由于空气热导率低, 改为负误差. 为减小可通过调节螺栓使 A、B 夹紧, 并可在上下表面涂硅油, 减小误差.

3. 金属导热大, $\theta_1 - \theta_2 = \frac{\delta \theta}{\delta t} \cdot \frac{h}{k_B}$, 为保证 $\theta_1 - \theta_2$ 足够大, 增加 $\frac{h}{k_B}$ 使其成为棒状, 选择垂直性好、面积小、长度长的金属棒, 使其与铜盘接触尽可能良好, 并用绝热材料包住表面, 基本满足一级条件.

北京航空航天大学

BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

原始数据.

① 找稳态.

时间 t/min .	1	2	3	4	5	6	7	8	
加热盘温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$.	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$.	50.8	51.0	51.3	51.5	51.6	51.7	51.8	51.9	
时间 t/min	9	10	11	12	13	14	15	16	17
加热盘温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$.	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$.	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.1	52.0	52.1
时间 t/min	18	19	20						
加热盘温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$.	77.9	77.9	77.9						
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$.	52.1	52.0	52.0						

王 峰

②. 冷却速率.

时间 t/s .	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
加热盘温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$.	67										
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$	68.0	67.3	66.7	65.8	64.9	63.9	62.9	62.1	61.1	60.1	59.3
时间 t/s .	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	
加热盘温度 $\theta_1/^\circ\text{C}$.											
散热盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$.	58.5	57.6	56.8	56.1	55.3	54.6	53.9	53.2	52.5	51.8	

北京航空航天大学

BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

时间t/s	315	330	345	360	375	390	405	420	435	450.
加盘温度$\theta_1/^\circ\text{C}$										
散盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$	51.2	50.6	50.0	49.4	48.8	48.1	47.6	47.1	46.6	46.1

时间t/s	465	480	495	510	525	540	555	570	585	600
加盘温度$\theta_1/^\circ\text{C}$										
散盘温度 $\theta_2/^\circ\text{C}$	45.5	45.0	44.5	44.0	43.6	43.2	42.8	42.3	41.9	41.5

时间t/s	615	630	645	660	675	690	705	720
加盘温度$\theta_1/^\circ\text{C}$								
散盘温度$\theta_2/^\circ\text{C}$								

三

③ 相关参数测量.

	1	2	3	4	5	平均.
mp/g	1133.41	1133.42	1133.40	1133.36	1133.40	
dp/mm.	130.08	130.10	130.06	130.10	130.06	
hp/mm	7.70 ^{10.10}	7.68 ^{9.98}	7.70 ^{10.06}	7.72 ^{10.08}	7.70 ^{10.00}	
hb/mm	8.24	8.38 ^{8.70}	8.26	8.28 ^{8.58}	8.26 ^{8.66}	
db/mm.	129.70	129.72	129.70	129.68	129.70	

王峰