

材料科学基础实验报告

实验名称： 使用热流计法和平面热源法测量材料的热导率

学 号： 22301056 姓 名： 王俊杰 班 级： 22 材物

合作者： 无 桌 号：

指导教师： 艾斌

实验日期：

实验考核

项目	实验预习	实验过程	分析与讨论	总评
评价				

1 实验目的

- 了解稳态热流计法测量材料的热导率（或导热系数）和样品的热阻的原理；
- 学会使用稳态热流计法测量不同材料的热导率和样品的热阻；
- 了解准稳态平面热源法测量材料的热导率和比热的原理；
- 学会用准稳态平面热源法测量材料的热导率和比热。

2 实验原理

2.1 热传导理论中的一些基本概念

傅立叶热传导定律:

$$q_c = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中, q_c 是热传导的速率 (单位: W), 它常常也被简称为热流, A 是热量流经的横截面积 (单位: m^2), dT/dx 是温度的梯度 (单位: K m^{-1}), 比例系数 k 是材料的热导率或导热系数 (单位: $\text{W m}^{-1} \text{K}$)。负号表示热量总是从温度高的位置流向温度低的位置。需要说明的是, 傅立叶定律适用于一维稳态热传导问题。根据式 (1), 材料的热导率可写作:

$$k = \frac{q_c}{A \left| \frac{dT}{dx} \right|} \quad (2)$$

为了引入热阻的概念, 已知一块长方体匀质材料左侧的温度为 T_1 , 右侧的温度为 T_2 , 且 $T_1 > T_2$, 两个侧面相距 L , 热传导的横截面积为 A , 假设单位时间从左侧传递到右侧的热量 (即热传导的速率) 为 q_c , 则材料的热阻为:

$$R_t = \frac{T_1 - T_2}{q_c} = \frac{1}{k} \cdot \frac{L}{A} \quad (3)$$

2.2 测量材料热导率的方法简介

有多种测量材料热导率的方法, 这些方法大致可分为两类: 稳态法和瞬态法。稳态法是在样品处于稳态热传导的条件下 (样品内部的温度分布不随时间变化) 进行测量的方法。稳态法包括保护平板法 (测量范围 $0.001 \sim 2 \text{ W m}^{-1} \text{K}$)、热流计法 (测量范围 $0.001 \sim 20 \text{ W m}^{-1} \text{K}$) 和保护热流计法 (测量范围 $0.01 \sim 400 \text{ W m}^{-1} \text{K}$)。稳态法的优点是利用傅立叶热传导定律计算热导率, 计算过程简单, 缺点是要求材料达到稳定热传导的状态, 测试时间长等。瞬态测量方法是在样品处于非稳态热传导条件下进行测量的方法。瞬态法包括热线法 (测量范围 $0.01 \sim 20 \text{ W m}^{-1} \text{K}$)、瞬态平面热源法 (测量范围 $0.01 \sim 20 \text{ W m}^{-1} \text{K}$) 和激光闪光法 (测量范围 $0.1 \sim 2000 \text{ W m}^{-1} \text{K}$)。准稳态法的优点是测量速度快、测量范围宽, 缺点是设备较为复杂和昂贵。

2.2.1 热流计法测量材料热导率的原理

图 1 给出了热流计法测量材料热导率的原理示意图。如图所示, 加热面 A 将热量经待测样品 B 传导到散热面 C (室温)。由于加热面 A 和散热面 C 都是由热的良导体铜板制作, 且与待测样品 B 紧密接触, 当达到稳态时可认为其温度就是样品上、下表面的温度 T_1 和 T_2 , 且 $T_1 > T_2$ 。对于

样品 B，假设其导热方向的厚度为 L ，面积为 A ，当达到稳态热传导时，只要准确测量出样品的厚度 L 和面积 A 、上下表面的温度 T_1 和 T_2 ，以及流经样品的热流 q_c ，就可以利用式 (3) 计算材料的热导率和热阻。

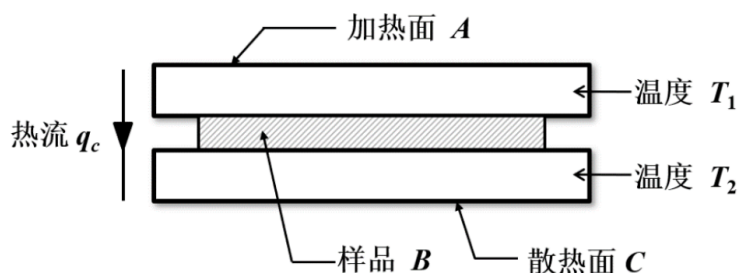


图 1: 热流计法测量材料热导率的原理示意图

2.2.2 平面热源法测量材料热导率的原理

如图 2 所示，考虑一无穷大导热平板的一维热传导问题。假设该平板的面积为无限大、厚度为 $2d$ ，初始温度为 T_0 。现从平板的两侧同时向中心面施加均匀的热流密度（单位时间通过单位截面积的热量，也被称为热通量） q_f (W m^{-2})，则平板上各点的温度 $T(x, t)$ 将随加热时间 t 而变化。

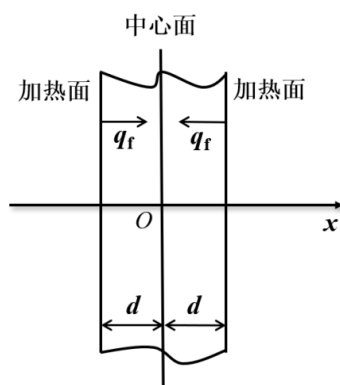


图 2: 厚度为 $2d$ 的无穷大导热平板的一维热传导模型示意图

以样品中心面上的一点为坐标原点 O ，以样品厚度方向为 x 轴方向，如图 2 所示，则平板上各处的温度 $T(x, t)$ 随位置 x 和加热时间 t 的分布可通过求解下面的偏微分方程得到：

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T(d, t)}{\partial x} = \frac{q_f}{k}, \quad \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0 \\ T(x, 0) = T_0 \end{cases} \quad (4)$$

该偏微分方程的解说明了当热流密度 q_c 恒定时，此时加热面和中心面之间的温度差 ΔT 保持恒定，与加热时间 t 无关，我们称这种状态为准稳态。当体系到达准稳态时：

$$\begin{aligned} k &= \frac{q_f d}{2\Delta T} \\ c &= \frac{q_f}{\rho d \frac{\partial T}{\partial t}} \end{aligned} \quad (5)$$

3 实验仪器

DRPL-I 热导率测试仪, 计算机, ZKY-BRDR 型准稳态法热导率、比热测试仪, 样品 (石英、白橡胶、铝合金、黑橡胶、有机玻璃)。

4 实验过程

4.1 使用稳态法 (热流计法) 测量样品的热阻和材料的热导率

本实验使用 DRPL-I 测试仪和基于稳态测试方法的热流计法对三种样品 (白橡胶、石英和铝合金) 的热导率和热阻进行测试。

4.1.1 测量方块状白橡胶样品的热阻和白橡胶的热导率

1. 测量样品尺寸, 安装样品
2. 设定加热温度, 等到系统进入稳态后用鼠标点击“开始测量”按钮进行自动测量
3. 测量完成后, 保存数据, 关机

4.1.2 测量圆柱形石英样品的热阻和石英的热导率

测量过程与橡胶块样品的测量过程类似, 所不同的是, 石英样品不像橡胶样品那样富有弹性, 为了确保石英样品与上、下铜板有良好的热接触, 需要在石英样品的上下底面涂抹适量的导热硅脂。

4.1.3 测量圆柱形铝合金样品的热阻和铝合金的热导率

使用游标卡尺测量铝合金样品的直径时, 要注意铝合金棒的直径不包含绝热层。使用游标卡尺测量上、下两个测温孔的距离作为铝合金样品的厚度。同样地, 每个量都需要测量 5 次, 并将结果记录在实验记录纸上。在铝合金样品的上、下底面涂抹少量导热硅脂, 然后, 将样品置于铜下面板的正中央。旋转手轮, 降下铜上面板使之与样品接触。用手旋转样品使导热硅脂尽可能均匀分布于两个接触面。将原来插入到上、下铜面板测温孔的热电偶测温端拔出, 蘸一些导热硅脂, 分别插入到样品侧面上、下两个测温孔中, 而且要将热电偶的测温端插到底 (插到样品中心)。旋转手轮, 直到四个支撑杆露出 10mm 左右, 以确保样品被上、下铜板夹紧。以下测量过程与橡胶块样品的测量过程相同。

4.2 使用准稳态法 (平面热源法) 测量有机玻璃和黑橡胶的热导率和比热

要使用 ZKY-BRDR 型测试仪测量材料的热导率和比热, 需准备 4 块尺寸完全相同的同质样品。四块样品 1、2、3 和 4 一字排开, 样品 2 和 3 之间的中央位置放置中心面热电偶测温端; 样品 1 和 2 之间为面加热器 1, 样品 3 和 4 之间为面加热器 2, 并在样品 3 和面加热器 2 之间的中央位置放置加热面热电偶测温端。测试时, 四块样品和两个面加热器被紧密挤压在一起, 确保样品和样品之间以及样品和加热器之间不存在空气隙, 且样品和加热器周围被绝热材料所包围。由于面加热器可对整个样品面积进行均匀加热, 且样品的横向尺寸大于样品厚度的 6 倍以上, 可以认为热传导只沿样品厚度方向进行, 所以之前在假设样品为无穷大的前提下推导出来的一维非稳态热传导公式对本实验仍然近似成立。由于面加热器可以向左、右两边加热, 所以在每个面加热器的两边配置了

两个相同的样品（它们具有相同的热阻），这样可使样品 2 或 3 获得的热流密度约等于面加热器一半的电功率。一旦确定了样品 2 和 3 从面加热器获得的热流密度 q_f ，只需测出体系进入准稳态后加热面和中心面之间的温度差（或样品 3 两侧的温度差） δT ，就可以计算材料的热导率。由于我们在样品 3 的两侧分别放置了中心面热电偶的测温端和加热面热电偶的测温端，且两个热电偶的冷端被放置在同一个保温杯中，在整个实验过程中两个热电偶的冷端温度保持恒定，所以测试过程中任意时刻样品 3 两侧的温差热电势 V_t （即两个热电偶的测温端温差热电势）可以由仪器测出。自然，我们便可以计算出材料的比热。

4.2.1 测量有机玻璃的热导率和比热

1. 安装样品
2. 设定加热电压
3. 测量加热面和中心面间的温差电动势 V_t 和中心面每分钟温升热电势

4.2.2 测量黑橡胶的热导率和比热

安装和测量黑橡胶样品的热导率和比热的操作步骤与安装和测量有机玻璃的热导率和比热的实验步骤类似，以下不再赘述。

5 实验数据与分析

表 1: 稳态法测量铝合金导热系数原始数据

序号	平均温度 °C	热面温度 °C	冷面温度 °C	样品厚度 mm	样品面积 mm ²	热流值 W	样品热阻 cm ² K W ⁻¹	导热系数 W m ⁻¹ K ⁻¹
1	37.41999817	38.66999817	36.18000031	76.66	1617.957	6.31400013	6.381000042	120.1453018
2	37.41999817	38.65000153	36.18000031	76.66	1617.957	6.287000179	6.356999874	120.5999985
3	37.41999817	38.65000153	36.18000031	76.66	1617.957	6.254000187	6.389999866	119.9670029
4	37.43999863	38.68000031	36.20000076	76.66	1617.957	6.229000092	6.441999912	119.0056992
5	37.41999817	38.63999939	36.20000076	76.66	1617.957	6.197000027	6.370999813	120.3352966
6	37.41999817	38.65000153	36.20000076	76.66	1617.957	6.15899992	6.43599987	119.1091003
7	37.43999863	38.65000153	36.22000122	76.66	1617.957	6.138000011	6.40500021	119.6800003
8	37.43999863	38.65999985	36.22000122	76.66	1617.957	6.123000145	6.447999954	118.8983002
9	37.41999817	38.63000107	36.22000122	76.66	1617.957	6.116000175	6.375999928	120.2406998
10	37.43999863	38.65000153	36.22999954	76.66	1617.957	6.09499979	6.423999786	119.3326035
11	37.45000076	38.65000153	36.25	76.66	1617.957	6.080999851	6.386000156	120.0506973
12	37.43999863	38.63999939	36.25	76.66	1617.957	6.061999798	6.379000187	120.1763992
13	37.45000076	38.65000153	36.25	76.66	1617.957	6.041999817	6.427000046	119.2807007
14	37.43999863	38.63000107	36.25	76.66	1617.957	6.041999817	6.373000145	120.2830963
15	37.43999863	38.63000107	36.25	76.66	1617.957	6.022999763	6.393000126	119.9048004
16	37.43999863	38.63000107	36.25	76.66	1617.957	6.011000156	6.406000137	119.6660004
17	37.41999817	38.59999847	36.25	76.66	1617.957	6.000999928	6.335999966	120.9921036
18	37.41999817	38.59999847	36.25	76.66	1617.957	5.993000031	6.343999863	120.8308029
19	37.41999817	38.59999847	36.25	76.66	1617.957	5.982999802	6.355000019	120.6292038
20	37.40999985	38.58000183	36.24000168	76.66	1617.957	5.96999979	6.342000008	120.8814011
21	37.40000153	38.58000183	36.22999954	76.66	1617.957	5.949999809	6.389999866	119.9636993
22	37.41999817	38.58000183	36.25	76.66	1617.957	5.946000099	6.340000153	120.9121017
结果数据	37.43	38.63	36.23	76.66	1617.957	6.071	6.39	120.007

表 2: 铝合金尺寸测量原始数据

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
样品厚度/mm	76.68	76.68	76.66	76.60	76.66	76.66
样品直径/mm	45.60	45.18	45.36	45.40	45.40	45.39

表 3: 准稳态法测量原始数据

记录次数	V_t	有机玻璃	升温热电势	V_t	黑橡胶	升温热电势
	mV	中心面热电势 mV	mV	mV	中心面热电势 mV	mV
1	0.014	0.004		0.022	0.032	
2	0.088	0.008	0.004	0.063	0.043	0.011
3	0.124	0.019	0.011	0.078	0.061	0.018
4	0.145	0.036	0.017	0.085	0.082	0.021
5	0.157	0.055	0.019	0.087	0.103	0.021
6	0.164	0.078	0.023	0.089	0.125	0.022
7	0.167	0.098	0.020	0.090	0.147	0.022
8	0.170	0.121	0.023	0.090	0.169	0.022
9	0.172	0.145	0.024	0.090	0.191	0.022
10	0.173	0.168	0.023	0.091	0.213	0.022
11	0.174	0.192	0.024	0.091	0.235	0.022
12	0.175	0.216	0.024	0.092	0.256	0.021
13	0.176	0.239	0.023	0.092	0.278	0.022
14	0.176	0.262	0.023	0.092	0.300	0.022
15	0.176	0.285	0.023	0.092	0.321	0.021
16	0.176	0.308	0.023	0.092	0.342	0.021
17	0.176	0.332	0.024	0.092	0.363	0.021
18	0.176	0.354	0.022	0.092	0.383	0.020
19	0.177	0.377	0.023	0.093	0.403	0.020
20	0.176	0.399	0.022	0.093	0.423	0.020

5.1 不确定度评估方法

5.1.1 A 类不确定度分量的评估

对一个随机变量 x 进行了 n 次重复测量, 其算术平均值 \bar{x} 作为对被测量 x 的最佳统计评估值, 平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$ 作为实验结果的标准不确定度, 自由度 $\nu = n - 1$ 。计算公式为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

5.1.2 B 类不确定度分量的评估

对一个非重复测量得到的量 x 进行不确定度分析时, 评估者需根据已获得的信息人为假定其服从某种概率分布来评估其方差 $u^2(x)$ 或标准不确定度 $u(x)$ 。具体步骤是, 首先根据量 x 的变化范围确定其半宽度 a , 然后根据假定的概率分布计算标准不确定度。

$$u(x) = \frac{a}{k} \quad (8)$$

在 100% 和 95% 置信概率下, 矩形分布时的包含因子 k 值分别为 $\sqrt{3}$ 和 1.65, 三角形分布时的包含因子 k 值分别为 $\sqrt{6}$ 和 1.90, 正态分布时的包含因子 k 值分别为 3 和 1.96。

5.1.3 直接测量量的合成标准不确定度

直接测量量的合成标准不确定度 $u_c(x)$ 由其 A 类标准不确定度分量 $s(\bar{x})$ 与其 B 类标准不确定度分量 $u(x)$ 采用方和根法合成, 即

$$u_c(x) = \sqrt{s^2(\bar{x}) + u^2(x)} \quad (9)$$

合成标准不确定度 u_c 的自由度称为有效自由度, 用 ν_{eff} 表示。当各分量间相互独立且合成量接近正态分布或 t 分布时, 有效自由度 ν_{eff} 可以由下面的韦尔奇-萨特韦特 (Welch-Satterthwaite) 公式计算

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{\frac{u_c^4(x)}{s^4(x)} + \frac{u^4(x)}{\nu_B}}{\frac{1}{\nu_A} + \frac{1}{\nu_B}} \quad (10)$$

式中 ν_A 和 ν_B 分别是 A 类和 B 类标准不确定度分量对应的自由度数。如果 ν_{eff} 不是整数, 则去掉小数部分取整, 即将 ν_{eff} 取为一个不大于 ν_{eff} 本身的整数。

5.1.4 标准不确定度的传播规律

标准不确定度传播规律的数学基础是全微分。假设间接测量量 y 与直接测量量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 满足函数关系 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 且各个直接测量量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 是相互独立的。对于以标准偏差表示的标准不确定度, 需以方和根的形式求和, 因此, 当各个直接测量量依次有 $u(x_1), u(x_2), u(x_3), \dots, x_n$ 的标准不确定度时, 间接测量量 y 的标准不确定度 $u_c(y)$ 可以表示为

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) \quad (11)$$

间接测量量 y 的有效自由度由下式计算

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{\frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\nu_i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\nu_i}} \quad (12)$$

当需要评定扩展不确定度 U 时, 可根据合成标准不确定度的有效自由度 ν_{eff} 和给定的置信概率 (譬如 95%), 通过查 t 分布表得出包含因子 k , 进而给出扩展不确定度 $U = ku_c$ 。

5.2 稳态法测量铝合金导热系数不确定度计算

5.2.1 仪器引入的不确定度

已知温度测量范围为：19~99.99℃，温度测量精度 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。热流计热流测量范围：0.5~2000 W，分辨率 0.25 W。游标卡尺的测量精度为 0.02 mm。假定矩形分布来评估仪器精度引入的不确定度。计算样品热导率测量结果的相对不确定度。假设包含因子 $k = 2$ ，给出扩展不确定度。

表 4: 仪器的不确定度

测量量	精度	B 类不确定度
温度/ $^\circ\text{C}$	0.05	0.0289
热流/W	0.25	0.1443
游标卡尺/mm	0.02	0.0115

5.2.2 数学模型

样品导热系数由式 (13) 给出

$$k = \frac{4q_c L}{\pi d^2 (T_1 - T_2)} \quad (13)$$

由表 1 可算得

$$\bar{k} = 120.00 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (14)$$

5.2.3 有贡献的方差

利用式 (11) 可得

$$u^2(k_i) = c_{1i}^2 u^2(q_c) + c_{2i}^2 u^2(L) + c_{3i}^2 u^2(d) + c_{4i}^2 u^2(\Delta T) \quad (15)$$

$$u^2(\bar{k}) = \frac{1}{20(20-1)} \sum_{i=1}^{20} (k_i - \bar{k})^2 \quad (16)$$

$$u_c^2(k) = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} u^2(k_i) + u^2(\bar{k}) \quad (17)$$

5.2.4 合成标准不确定度

带入数据计算式 (17) 可得

$$u_c^2(k) = 10.3647 + 0.0214359 = 10.3861 \text{ W}^2 \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-2} \quad (18)$$

或

$$u_c(k) = 3.22275 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \approx 3.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (19)$$

相对不确定度为

$$\frac{u_c(k)}{k} = \frac{3.22275}{120.000} = 2.7\% \quad (20)$$

5.2.5 扩展不确定度

包含因子 $k = 2$ ，可得

$$U(k) = ku_c(k) = 6.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (21)$$

最终结果可表示为

$$k = (120.0 \pm 6.5) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (22)$$

5.3 准稳态法测量结果

表 5: 准稳态法测量结果

样品	热导率	热容
有机玻璃	$0.175 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1.36 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
黑橡胶	$0.336 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1.29 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

6 思考题

1. 根据实测值和参考值估算这三种材料的热导率的相对误差，并分析误差的来源。（铝合金 $k = 121 \sim 180 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）

取 $121 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 为参考值，则相对误差为：0.36%，对于铝合金样品，误差可能有以下来源：

- 湿度可能会有略微影响
- 硅脂涂抹过多，硅脂导热并不好，仅用来填平空隙防止空气进入
- 仪器测量、稳态法方法导致的系统误差

2. 平板热流法实验使用铜—康铜热电偶测温。为什么冷端要放到冰水混合物中？

实验时需测得热端温度，因此需要让冷端温度已知，才可以计算得到热端温度，但如果实验中仅仅只需要计算两个热端温差，可以参照准稳态法将两个冷端放在同一个保温杯中，保证温度相同即可。

3. 比较稳态法和准稳态法测量材料热导率的优缺点

稳态法：

- 数学表达式简单，但精度低
- 部分适用于粉末状、颗粒状或固体形式
- 对于平板状和空心圆筒状样品，热量散失不可忽略；对于异形样品，很难测试
- 是低电导率样品的绝对和主要方法
- 要求材料达到稳定热传导的状态的时间长

准稳态法：

- 部分适用于粉末状、颗粒状或固体形式

- 测量范围宽
 - 测量时间更短，精度更高
 - 对于平板状和空心圆筒状样品，热量散失不可忽略
 - 要求材料达到稳定热传导的状态的时间长
4. 已知有机玻璃的热导率 $\lambda = 0.17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，比热 $c = 1.31 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ；橡胶的热导率 $\lambda = 0.426 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，比热 $c = 1.19 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。根据实测值和参考值估算两种材料的热导率和比热的相对误差，并分析误差的来源

样品	热导率相对误差	热容相对误差
有机玻璃	3.23%	3.49%
黑橡胶	21.22%	8.02%

误差来源：

- 可能未等到仪器完全散热即开始下一组测试
 - 在实际操作实验过程中待测样品周围的空气温度并非一直不变，样品室内空气温度升高使得测量值较实际值偏大
 - 可能没有拧紧转轮，导致样品对外有散热
 - 但与其它同学测得的结果较为接近，也有可能是长时间放置导致样品实际热学性能与标准产生偏差
5. 判定系统达到准稳态导热的依据是什么？

准稳态是指物质内各个点的温升速率相同且保持不变，样品内两点间温差恒定。也就是 V_t 和 ΔV 不变