

准稳态法测不良导体的比热容和 导热系数

常见材料的热导率

几种典型材料在 20 ℃ 时的热导率数值

材料名称	$\lambda / [W/(m \cdot K)]$	材料名称	$\lambda / [W/(m \cdot K)]$
金属(固体):		松木(平行木纹)	0.35
纯银	427	冰(0 ℃)	2.22
纯铜	398	液体:	
黄铜(70% Cu, 30% Zn)	109	水(0 ℃)	0.551
纯铝	236	水银(汞)	7.90
铝合金(87% Al, 13% Si)	162	变压器油	0.124
纯铁	81.1	柴油	0.128
碳钢(约 0.5% C)	49.8	润滑油	0.146
非金属(固体):		气体:(大气压力)	
石英晶体(0 ℃, 平行于轴)	19.4	空气	0.025 7
石英玻璃(0 ℃)	1.13	氮气	0.025 6
大理石	2.70	氢气	0.177
玻璃	0.65~0.71	水蒸气(0 ℃)	0.183
松木(垂直木纹)	0.15		

不良导体的实际应用

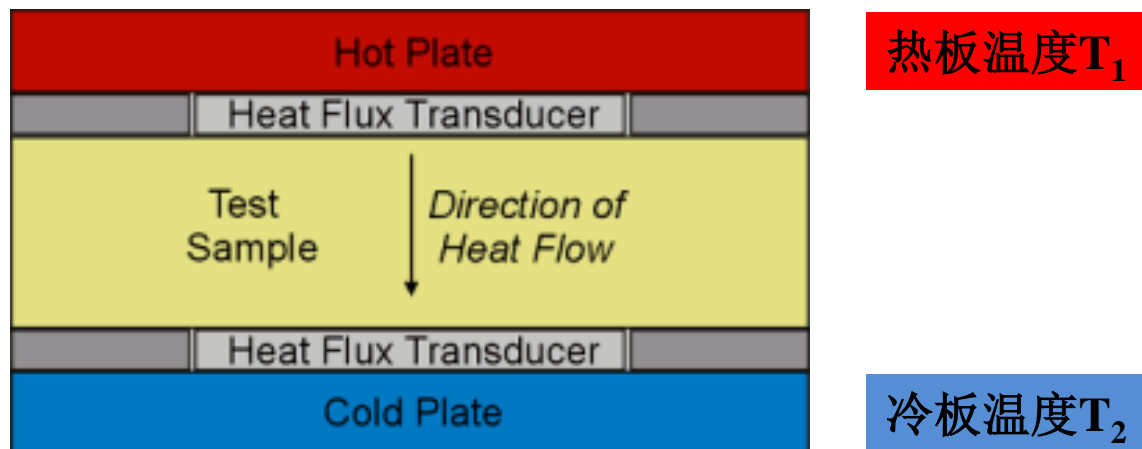
- **耐火材料**常被用作炉子的衬套，因为它们既能耐高温，又具有良好的绝热特性，可以减少生产中的能量损耗。
- **航天飞机**常使用**陶瓷瓦**作挡热板。陶瓷瓦能承受航天飞机回到地球大气层时产生的高温，有效防止航天器内部关键部件的损坏。
- 在现代化的**燃气涡轮电站**，涡轮的叶片上的**陶瓷涂层**（如稳定氧化锆）能保护金属基材不受腐蚀，降低基材上的热应力。

实验目的

1. 了解准稳态法测量导热系数和比热容的原理
2. 学习热电偶测量温度的原理和使用方法
3. 利用准稳态法测量不良导体的导热系数和比热容

导热系数的主要测量方法

1. 稳态法



2. 准稳态法

- ◆ 可同时测量物体的导热系数、比热和热扩散系数
- ◆ 测量方法比较准确
- ◆ 物理思想清晰，现象直观
- ◆ 不需要复杂的数学计算

3. 非稳态法

准稳态法实验原理

热传导：物体中由温度差所引起的能量迁移

1822年，傅里叶首次阐释了导热热流和温度梯度的正比关系，即一维傅里叶导热定律：

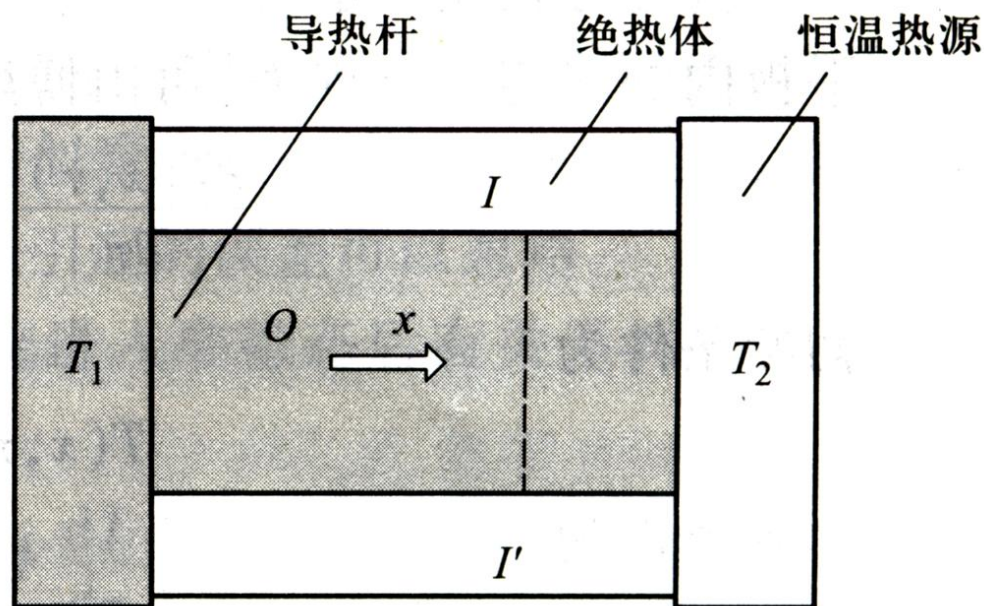
$$Q = -\lambda F \frac{dT}{dx}$$

定义热流密度为：

$$q = \frac{Q}{F} \quad \text{单位为：W/m}^2$$

则有：

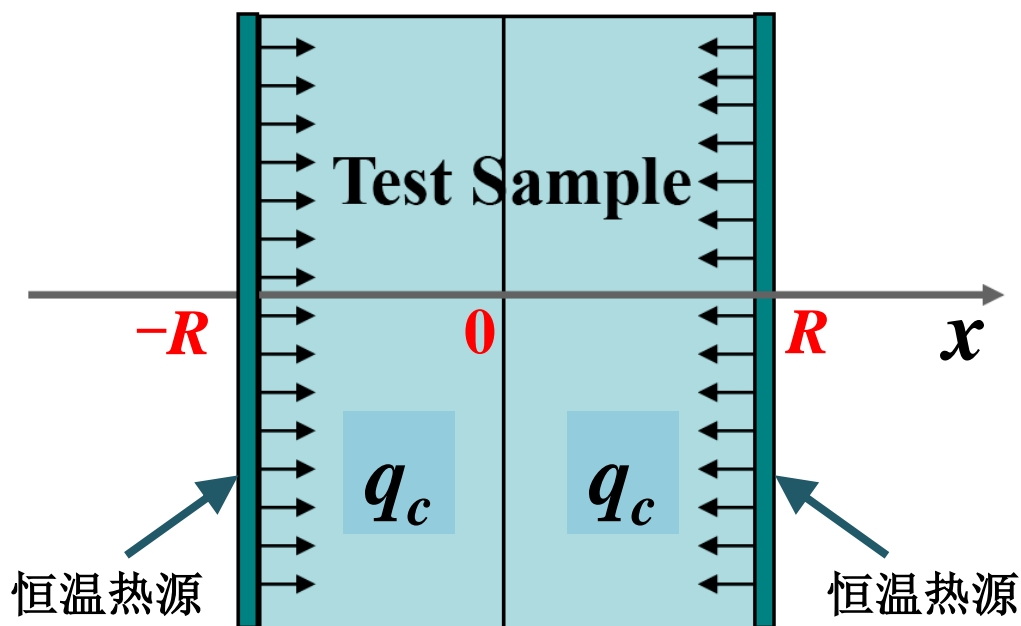
$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$



其中， λ 是导热系数，单位为：W/m K 或 J/m s K

准稳态法实验原理

一维无限大导热模型



平板内的热传导方程为:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}$$

初始条件为:

$$T(x, 0) = T_0$$

边界条件为:

$$\left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\pm R} + \frac{q_c}{\lambda} = 0$$

$$\left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

其中, α 是导温系数(也称为热扩散率)

$$\alpha = \lambda / (c \cdot \rho)$$

↓ 热导率
比热容
质量密度

准稳态法实验原理

热传导方程的解(平板内横截面上 x 处的温度及其随时间的变化):

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{\alpha \tau}{R} - \frac{R^2 - 3x^2}{6R} + R \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \cos(\mu_n \frac{x}{R}) \exp(-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}) \right]$$

式中, $\mu_n = n\pi$, $n=1,2,3, \dots$; $F_0 = (\alpha \tau)/R^2$ 为傅里叶常量; T_0 为初始温度。

当加热时间足够长时, $F_0 > 0.5$, Σ 项随时间指数衰减, 可忽略, 则:

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q_c R}{\lambda} \left[\frac{\alpha \tau}{R^2} + \frac{x^2}{2R^2} - \frac{1}{6} \right]$$

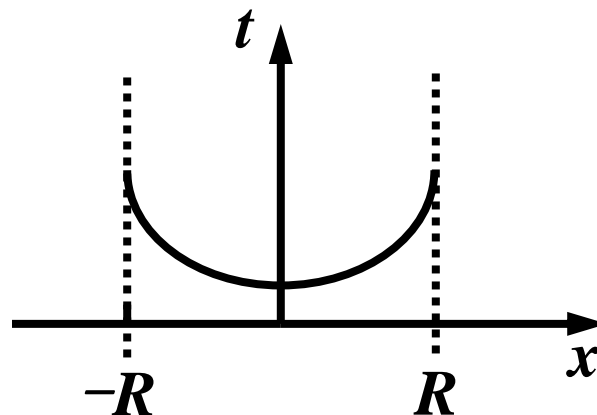
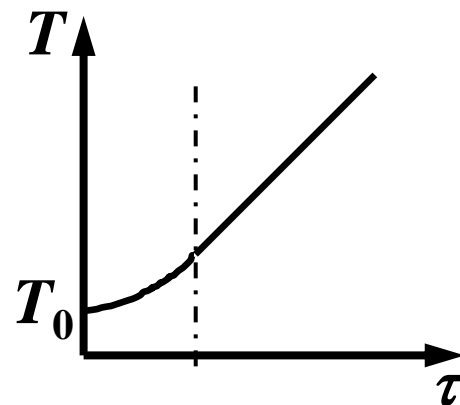
准稳态法实验原理

准稳态温度变化的特点：

温度和加热时间呈线性关系

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{a\tau}{R} + \frac{x^2}{2R} - \frac{1}{6} \right]$$

温度和位置呈抛物线关系



样品中各点温度随时间线性变化时的状态叫准稳态

准稳态法实验原理

系统进入准稳态时，给定位置处的温差不随时间变化

在 $x = 0$ 处，有：

$$T(0, \tau) - T_0 = \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{\alpha \tau}{R} - \frac{1}{6} \right]$$

在 $x = \pm R$ 处，有：

$$T(R, \tau) - T_0 = \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{\alpha \tau}{R} + \frac{1}{3} \right]$$

两处的温差恒定：

$$\Delta T = T(R, \tau) - T(0, \tau) = \frac{1}{2} \frac{q_c R}{\lambda} \Rightarrow \boxed{\lambda = \frac{q_c R}{2 \Delta T}}$$

样品厚度 R 、热流密度 q_c 和温差 ΔT 均可以实验测量确定

准稳态法实验原理

系统进入准稳态时，平板内任一横截面上的温度可以表示为：

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q_c R}{\lambda} \left[\frac{\alpha \tau}{R^2} + \frac{x^2}{2R^2} - \frac{1}{6} \right]$$



$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{q_c \alpha}{\lambda R} = \frac{q_c}{c \rho R}$$



$$c = \frac{q_c}{\rho R \frac{dT}{d\tau}}$$

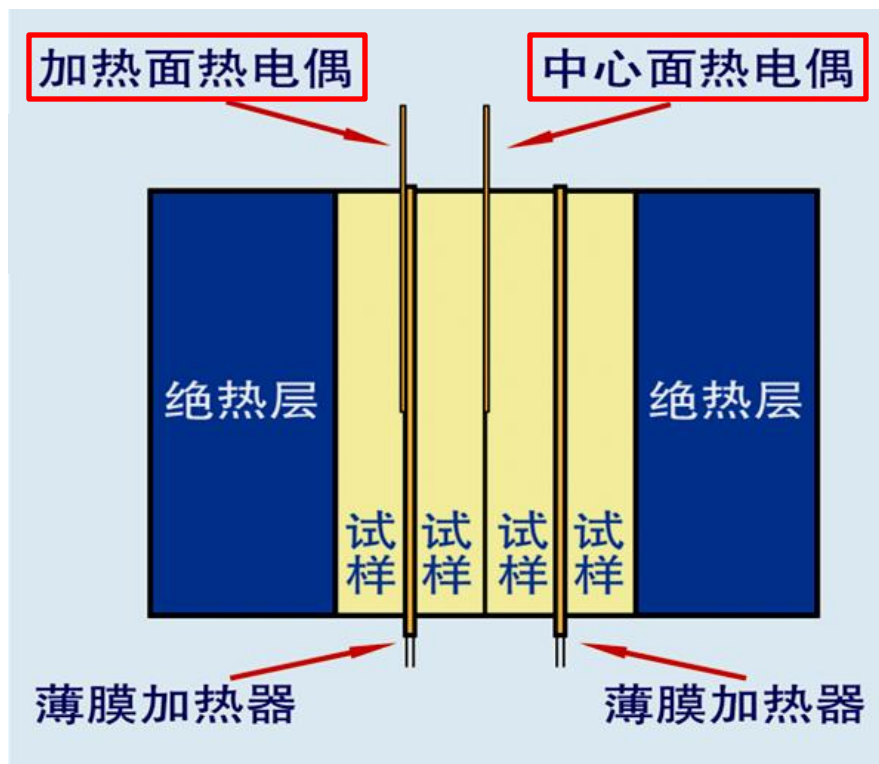
ρ 是样品的密度，

$dT/d\tau$ 是准稳态下样品的温升速率，

可由中心面处 $T(x, \tau)$ - τ 曲线的斜率求得。

准稳态法实验装置

实际设计须考虑的因素：散热问题，样品尺寸，热流密度的精确测定，仪器结构如下：



加热器采用薄膜加热器，
加热功率 $P = V^2/r$

采用对称性设计，热流密度 q_c
可表示为：

$$q_c = \frac{P}{F} = \frac{AV^2}{2Fr} \quad (\text{J/m}^2 \cdot \text{s})$$

A=0.85, 边缘效应修正系数
↑
↓
加热面积 加热膜电阻

样品横向尺寸为厚度的**6倍**以上时，非无限大平板引起的误差可以忽略。

热电偶测量原理

热电效应：两种不同的导体两端相互紧密的连接在一起，组成一个闭合回路，当两接点温度不等（ $T > T_0$ ）时，回路中就会产生电动势，从而形成电流。

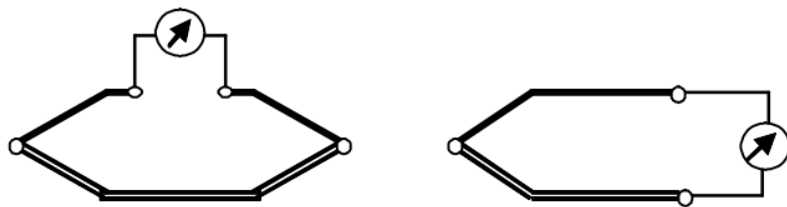


上述两种不同导体的组合称为**热电偶**。温差电动势

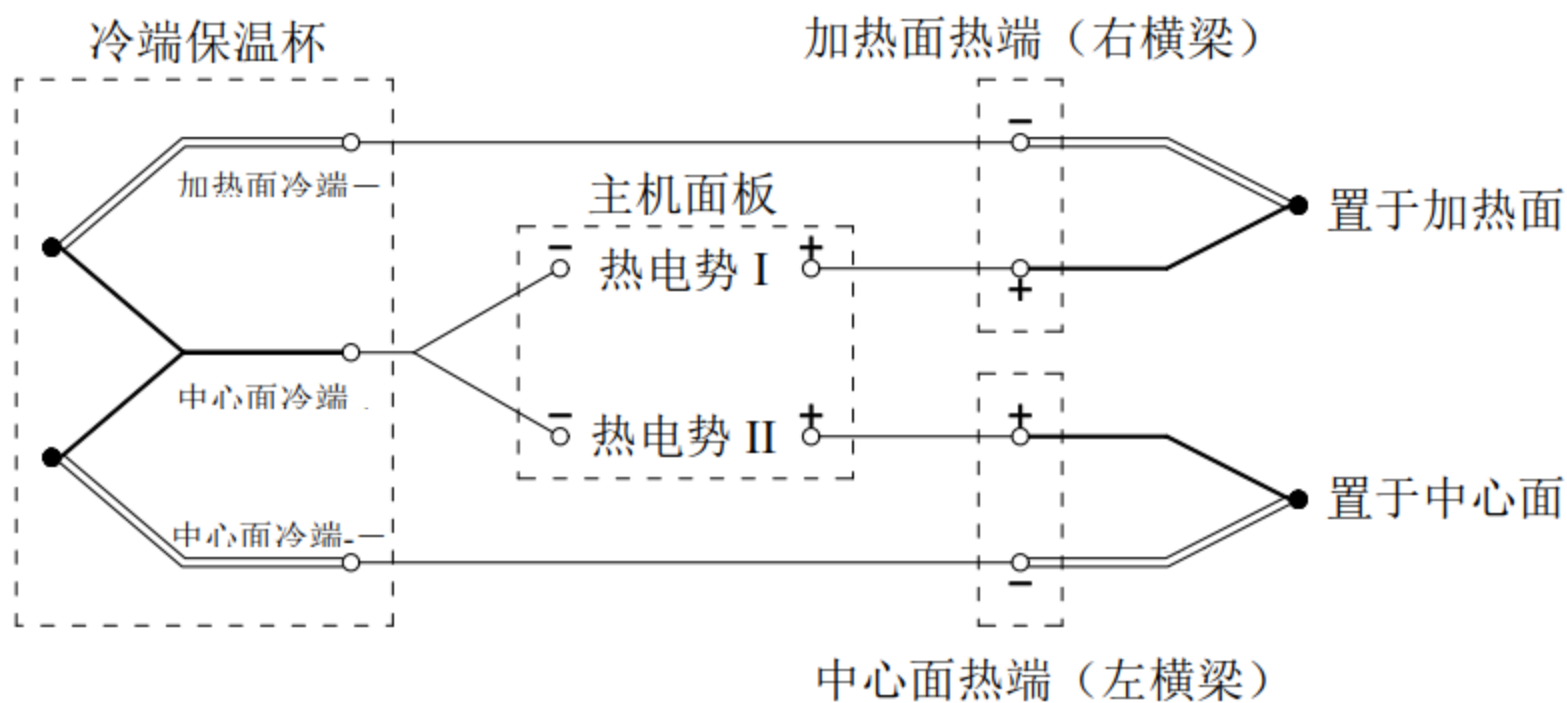
$$\Delta V = S \Delta T$$

↓
赛贝克系数（温差电动势系数）

接线示意图

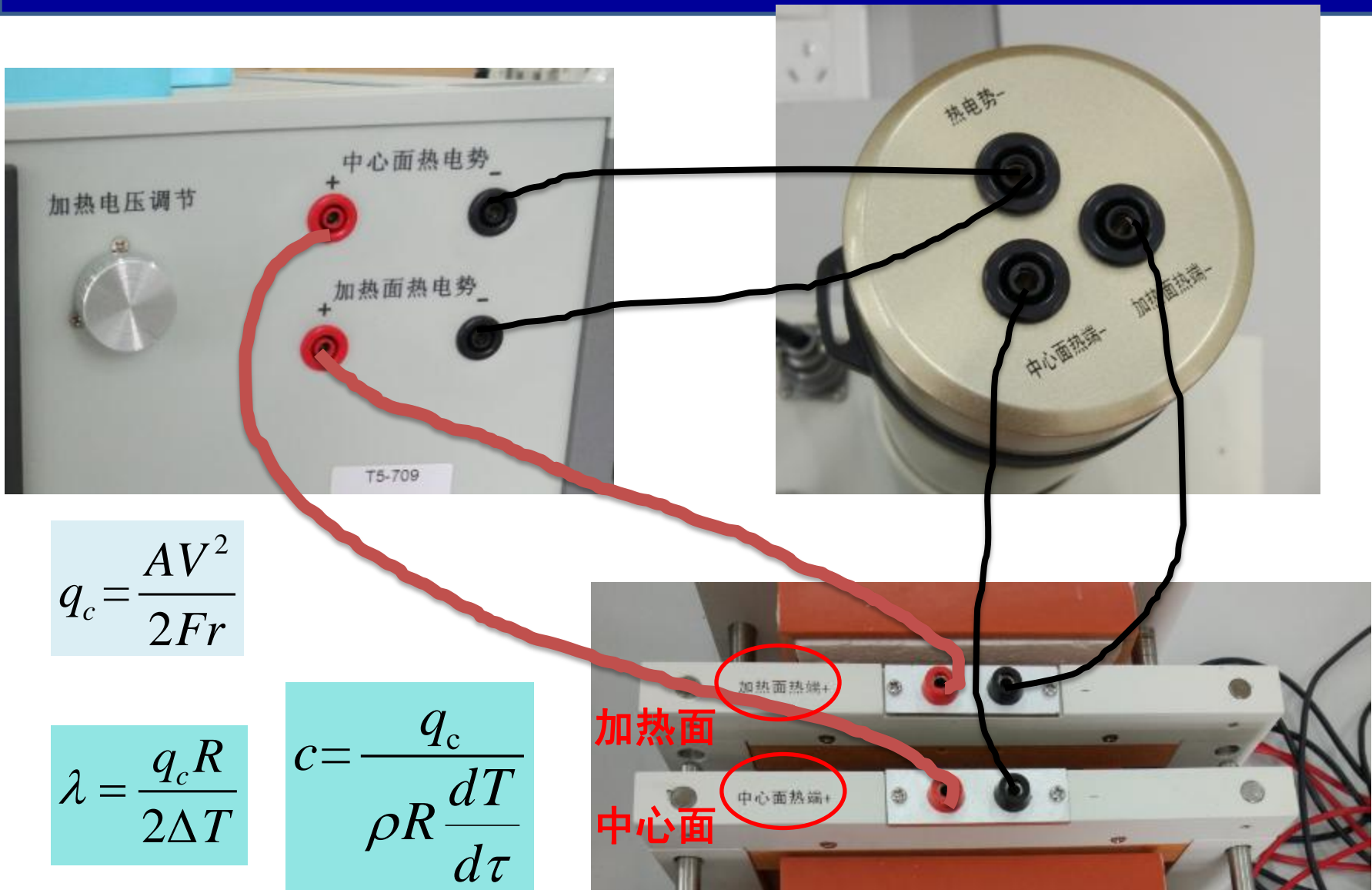


温差及温升速率测量



热电偶测温电路连接原理图

温差及温升速率测量



实验内容及操作要点

1. 安装样品并连接各部分电路

- 热电偶的测温端应保证置于样品的中心位置
- 记下加热膜电阻值（取平均）
- 放好热电偶和有机玻璃样品后，旋动螺杆旋钮，压紧样品，然后连接线路



2. 设定加热电压

- 检查各部分接线，确保无误后开机
- 加热电压：16~19V

[illegible]

实验内容及操作要点

4. 样品更换成橡胶，测定下一组数据

- 关闭主机电源开关
- 旋螺杆以松开实验样品
- 取下热电偶传感器
- 取出实验样品
- 等待加热薄膜冷却（等待15分钟左右）

注意事项

1. 在取样品的时候，必须先将中心面横梁热电偶取出，再取出实验样品。**严禁以热电偶弯折**的方法取出实验样品，这极易损坏热电偶
2. 加热电压设定后**不能再改变**
3. 当测完一种样品需要更换样品进行下一次实验时，**需等待加热膜冷却**后再操作
4. 重做实验，必须用**充分冷却的试样**

报告要求

1. 用坐标纸画出 ΔT - τ 及 T - τ 曲线，从图上判断何时进入准稳态
2. 计算有机玻璃样品和橡胶样品的导热系数和比热容

讨论

1. 本实验中我们采取在样品两端加热的方式根据加热面与中心面的温差及端面温升速率求出导热系数和比热。
实验中为何使用四块样品？
2. 本实验中判断系统进入准稳态的条件是什么？
3. 本实验中准稳态会无限保持下去吗？是否时间越长实验数据越好？

请仔细阅读《实验指导书》中的
实验内容和要求

有关物理概念与定义

导热系数 (热导率) λ : 表征材料热传导能力的物理量

定义：在稳定导热条件和单位温差作用下，
通过单位厚度、单位面积匀质材料的热流量。

单位：瓦/米·度，(W/m K，或J/m s K)

比热容 (比热) c : 单位质量物质的热容量

定义：单位质量的某种物质温度升高1℃吸收的热量。

单位：焦耳/(千克·开)， J/(kg·K)

导温系数(热扩散率) α :

表征在加热或冷却时各部分温度趋于一致的能力。

定义：材料的导热系数与其比热容和密度乘积的比值。

单位：平方米/秒， m^2/s