
实验：稳态法测不良导体的热导率

【实验目的】

1. 了解热传导现象的物理过程。
2. 了解物体散热速率和传热速率的关系。
3. 学会用铂电阻型传感器测定温度。
4. 学习一种测量材料导热系数的实验方法。

【预备问题】

1. 什么是稳定导热状态（简称稳态）？如何判定实验达到了稳定导热状态？
2. 待测样品盘是厚一点好？还是薄一点好？为什么？
3. 如何根据冷却曲线求出温度 T_2 附近的冷却速率？

【实验原理】

热传导是热量传递的三种基本形式之一，是指物体各部分之间不发生相对宏观位移情况下由于温差引起的热量的传递过程，其微观机制是热量的传递依靠原子、分子围绕平衡位置的振动以及自由电子的迁移。在金属中自由电子起支配作用，在绝缘体和大部分半导体中则以晶格振动起主导作用。

法国科学家傅里叶（J. B. J. Fourier 1786——1830）根据实验得到热传导基本关系，1822 年在其著作《热的解析理论》中详细的提出了热传导基本定律，指出导热热流密度（单位时间通过单位面积的热量）和温度梯度成正比关系。数学表达式为：

$$q = -\lambda \text{grad } T$$

此即傅里叶热传导定律，其中 q 为热流密度矢量（表示沿温度降低方向单位时间通过单位面积的热量）， λ 是导热系数又称热导率，是表征物体传导热能力的物理量， λ 在数值上等于每单位长度温度降低 1 个单位时，单位时间内通过单位面积的热量，其单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。一般说来，金属的导热系数比非金属的要大；固体的导热系数比液体的要大；气体的导热系数最小。因此，某种物体的导热系数不仅与构成物体的物质种类密切相关，而且还与它的微观结构、温度、压力、湿度及杂质含量相联系。在科学实验和工程设计中，需要了解所用物体的一些热物理性质，导热系数就是重要指标之一，常常需要用实验的方法来精确测定。

测量导热系数的方法很多，没有哪一种测量方法适用于所有的情形，对于特定的应用场合，也并非所有方法都能适用。要得到准确的测量值，必须基于物体的导热系数范围和样品特征，选择正确的测量方法。测量方法可以分为稳态法和非稳态法两大类。稳态法是在加热和散热达到平衡状态、样品内部形成稳定温度分布的条件下进行测量的方法。非稳态法则是在测量过程中样品内部的温度分布随时间是变化的，测出这种变化，得到热扩散率再利用物体已知的密度和比热，求得导热系数。本实验采用稳态平板法测量物体的导热

系数，该法设计思路清晰、简捷，具有典型性和实用性。

稳态平板法测量物体的导热系数原理示意图如图 1，发热盘 A 将热量传到待测物体样品盘 B，再传到散热盘 C，由于 A、C 盘是用热的良导体做的，与待测样品盘 B 紧密接触，其温度可以代表 B 盘上、下表面的温度 T_1, T_2 ，($T_1 > T_2$)，在样品盘 B 内，若热传导方向垂直于上、下表面，两表面彼此间相距为 h_B 、面积均为 S ，当热传导达到稳定状态时，即 T_1 和 T_2 的值不变，根据傅立叶热传导定律，则在 Δt 时间内通过 B 盘的热量 ΔQ 满足下述表达式：

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{B \text{ 稳态}} = \lambda \cdot S \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{h_B} \quad (1)$$

式中 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 为热流量， λ 即为该物质的导热系数（又称作热导率），

若样品盘 B 做成圆盘，其半径为 R_B ，由式 (1) 可以知道，单位时间内通过待测样品 B 任一圆截面的热流量为：

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{B \text{ 稳态}} = \lambda \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{h_B} \cdot \pi \cdot R_B^2 \quad (2)$$

当热传导达到稳定状态时，此时通过 B 盘上表面的热流量与由散热盘 C 向周围环境散热的速率相等，即

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)_{B \text{ 稳态}} = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)_{C \text{ 散热}} \quad (3)$$

因此可通过 C 盘在稳定温度 T_2 时的散热速率来求出热流量 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 。实验中，在读得稳态时的

T_1 和 T_2 后，即可将 B 盘移去，而使发热盘 A 的底面与散热盘 C 直接接触。当盘 C 的温度上升到高于稳态时的 T_2 值若干摄氏度后，再将发热盘 A 移开，让散热盘 C 自然冷却。

观察它的温度 T 随时间 t 变化情况，然后由此求出 C 盘在 T_2 的冷却速率 $\left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2}$ ，散热盘 C 的散热速率与其冷却速率的关系为

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)_{C \text{ 散热}} = mc \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{T=T_2} \quad (4)$$

式(4)中 m 是散热盘的质量， c 是散热盘的比热。

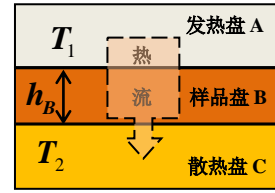


图 1

但要注意，这样求出的 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ 是 C 盘的全部表面暴露于空气中的冷却速率，其散热表面

积为 $2\pi \cdot R_C^2 + 2\pi \cdot R_C \cdot h_C$ （其中 R_C 与 h_C 分别为 C 盘的半径与厚度）。然而，在观察

测试样品的稳态传热时，C 盘的上表面（面积为 πR_C^2 ）是被样品覆盖着的，根据物体的冷却速率与它的表面积成正比的原理，这部分面积计算时应予以扣除。那么稳态时 C 盘的散热速率的实际表达式应按如下修正：

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{C \text{ 散热}} = m \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot \frac{(\pi \cdot R_C^2 + 2\pi \cdot R_C \cdot h_C)}{(2\pi \cdot R_C^2 + 2\pi \cdot R_C \cdot h_C)} \quad (5)$$

将式（5）代入式（2），得：

$$\lambda = m \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot \frac{(R_C + 2h_C) \cdot h_B}{(2R_C + 2h_C) \cdot (T_1 - T_2)} \cdot \frac{1}{\pi \cdot R_B^2} \quad (6)$$

【实验仪器】

TC-3B 型导热系数测定仪，游标卡尺，胶木盘，硅橡胶盘，等。

TC-3B 型导热系数测定仪如图 2 所示。该仪器采用低于 36V 的隔离电压作为加热电源，安全可靠。整个加热圆筒可上下升降和左右转动，发热圆盘 A 和散热圆盘 C 的侧面各有一小孔，作为插入铂电阻温度传感器之用。散热盘 C 放在可以调节的三个螺栓（接触点隔热）上，可使待测样品盘的上下两个表面与发热圆盘和散热圆盘紧密接触，散热盘 C 下方有一个轴流式风扇，在需要快速降温时用来强制散热。插在加热圆筒内的铂电阻温度传感器作为系统控温和上盘温度检测之用（出厂时已安装）。另两个铂电阻温度传感器分别插入散热铜圆盘 C（下盘）或发热铝圆盘 A（上盘）的侧面小孔内。铂电阻温度传感器插入时，其表面要涂少量的硅脂，两个铂电阻温度传感器的接线端与切换开关相连，可以由数字表方便地读取上、下盘的温度值。仪器的数字计时装置，计时范围 166min，分辨率 0.1s，供实验计时用。仪器还设置了 PID 自动温度控制装置，控制精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，分辨率 0.1°C ，供实验时控制加热温度用。

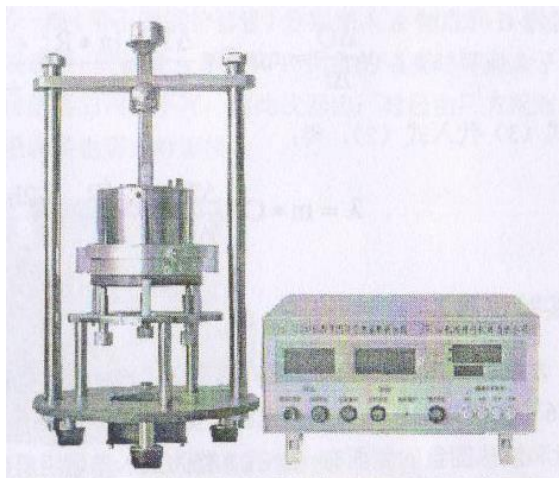


图 2 TC-3B 型稳态法固体导热系数测定仪

【实验内容】

一、散热盘 C 和待测样品 B 的直径、厚度的测量。

1. 用游标卡尺测量待测样品盘 B 的直径和厚度，各测 5 次。
2. 用游标卡尺测量散热盘 C 的直径和厚度，各测 5 次，C 盘的质量已用钢印打在上面，请直接记录。

二、固体导热系数的测量：

1. 连接导线：实验时，在仪器机箱的后部根据指示牌所指示内容（温度传感器、加热电源、风扇电源），用三根专用导线与测试支架上的三个插座连接，两个铂电阻测温传感器导线接到测试支架的切换开关上的插座中，通过切换开关后与仪器机箱前面板上左侧的“测温传感器”插座相联。

2. 安装待测样品：在支架上先放上散热圆铜盘 C，再在 C 的上面放上待测样品盘 B，然后再把带发热器的圆铝盘 A 放在盘 B 上，再调节三个螺栓，使样品盘的上下两个表面与发热铝盘 A 和散热铜盘 C 密切接触。将两个铂电阻测温传感器分别插入发热铝盘 A（上盘）和散热铜盘 C（下盘）上的小孔中。

3. 设置加温上限温度：接通电源，在“温度控制”仪表上设置加温的上限温度如 60°C （PID 智能温度控制器的具体操作见附录），不要超过 100°C 。

4. 观测升温过程和稳态温度：打开加热开关，每隔 2 分钟记下发热铝盘 A 和散热铜盘 C 的温度。当发热铝盘 A、散热铜盘 C 的温度不再上升时（大约需要加热半个小时左右），这时再每隔 2 分钟测量并记录 T_1 和 T_2 的值，测 5 组，该 5 组数据的平均值作为其稳态温度。

5. 散热速率的测量：在读得稳态时的 T_1 和 T_2 后，即可将 B 盘移去，而使发热铝盘 A 的底面与散热铜盘 C 直接接触。当 C 盘的温度上升到高于稳态时的 T_2 值若干摄氏度（例如 5°C 左右）后，再将发热铝盘 A 移开，让散热铜盘 C 自然冷却。测量散热盘的温度 T 随时间 t 的变化关系，每隔 30 秒记录一次温度 T ，直至温度到 T_2 之下若干摄氏度为止。

根据测量值可以计算出 C 盘散热速率 $\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{\text{C 散热}}$ 。

6. 如果还要测量另一种材料的导热系数，可打开轴流式风扇，待散热盘 C 的温度接近室温后再关上风扇。接下来重复步骤 2~5 即可。

【数据处理】

1. 散热盘 C 的有关物性参数：紫铜的比热 $C=394\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，密度 $\rho=8.9\text{g}/\text{cm}^3$

2. 数据表 1： 散热盘和样品盘的几何参数（散热盘 C 质量 $m = \underline{\hspace{2cm}}\text{g}$ ）

测量次数		1	2	3	4	5
散热盘 C	D _c (cm)					
	H _c (cm)					
样品盘 B	D _B (cm)					
	h _B (cm)					

3. 数据表 2: 观测升温过程和稳态温度记录 ($\bar{T}_1 = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$, $\bar{T}_2 = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$)

测量次数										
$T_A(^{\circ}\text{C})$...
$T_C(^{\circ}\text{C})$...

4. 数据表 3: 散热盘冷却速率测量 (每隔 30 秒测一次)

测量次数										
时间 $t(\text{s})$										
温度 $T(^{\circ}\text{C})$										

5. 根据数据表 3 的数据, 计算散热盘 C 稳态时在 T_2 附近的冷却速率。计算出样品材料的导热系数, 求出不确定度, 并写出结果表达式。

说明: (长度、质量测量误差忽略, 本实验只考虑冷却速率的误差)

6. 作 A 盘和 C 盘的升温曲线, 并解释热传导的规律。作 C 盘冷却曲线图。

7. 结果分析。

【注意事项】

1. 铂电阻温度传感器插入发热铝盘 A 和散热铜盘 C 侧面的小孔时应在温度传感器头部涂上导热硅脂, 并插到孔洞底部, 避免因传感器接触不良, 造成温度测量不准。
2. 实验中, 抽出被测样品时, 应先旋松加热圆筒上端的固定螺钉。样品取出后, 小心将加热圆筒降下, 使发热铝盘 A 与散热铜盘 C 接触, 重新拧紧固定螺钉。
3. 实验操作过程中要注意防止高温烫伤。
4. 实验前, 要标定一下两测温传感器的读数, 若不一致, 要进行修正。

5. 用稳态法测量导热系数时，要使温度稳定下来，约要半个小时左右。待 T_2 的数值在几分钟内不变时，即可认为已达到稳定状态。

【思考题】

如何利用本实验仪器测量空气的导热系数？

【附录】

PID 智能温度控制器是一种高性能、可靠性好的智能型调节仪表，广泛使用于机械化工、陶瓷、轻工、冶金、热处理等行业的温度、流量、压力、液位自动控制系统。控制器面板布置图(见图 3):例如需要设置加热温度为 30°C ，具体操作步骤如下：

1. 先按设定键 SET 0.5 秒，进入温度设置。（注：若学生不慎按设定键时间长达 5 秒，出现进入第二设定区符号，这时只要停止操作 5 秒，仪器将自动恢复温控状态。）

2. 按位移键，选择需要调整的位数，数字闪烁的位数即是可以进行调整的位数。

3. 按上调键或下调键确定这一位数值，按此办法，直到各位数值符合设定温度值。

4. 再按设定键 SET 1 次，设定工作完成。如需要改变温度设置，只要重复以上步骤就可。

【参考文献】

1. 吴泳华，霍剑青，熊永红. 大学物理实验. 北京：高等教育出版社，2004
2. 周殿清. 大学物理实验. 武汉：武汉大学出版社，2002



图 3 PID 温度控制器面板布置图