

导热系数的测量

Measurement of Thermal Conductivity

【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. 掌握稳态法测量不良导体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？

【实验背景】

导热系数是表征物质热传导性质的物理量。材料结构的变化与所含杂质等因素都会对导热系数产生明显的影响，因此，材料的导热系数常常需要通过实验来具体测定。测量导热系数的方法比较多，但可以归并为两类基本方法：一类是稳态法，另一类为动态法。用稳态法时，先用热源对测试样品进行加热，并在样品内部形成稳定的温度分布，然后进行测量。而在动态法中，待测样品中的温度分布是随时间变化的，例如按周期性变化等。本实验采用稳态法进行测量。

【思政元素】

东汉王充在他的著作《论衡·寒温篇》中写道：“夫近水则寒，近火则温，远之渐微，何则？气之所加，远近有差也。”他把“气”作为物体之间进行“温”“寒”传递的物质承担者，还指出距离变远，“气”的作用渐小。南北朝成书的《关尹子》中认为：“外物”的来去是使瓦石一类物体发生寒热温凉之变的原因，这里已涉及热传递的理论问题。

【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：

$$q = -\lambda \text{grad } T \quad (1)$$

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:

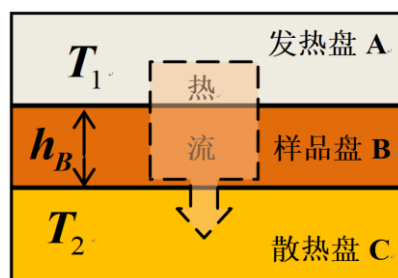


图 1 热传导原理图

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

式中 $\Delta Q / \Delta t$ 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 为圆盘, 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:

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{B \text{ 稳态}} = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{h_B} \pi R_B^2 \quad (3)$$

热传导达到稳定状态时, 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

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)_{B \text{ 稳态}} = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)_{C \text{ 散热}} \quad (4)$$

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 $\Delta Q / \Delta t$ 。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, 散热盘 C 的散热速率与其冷却速率的关系为:

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{C_{\text{散热}}} = mc\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{T=T_2} \quad (5)$$

式中 m 是散热盘的质量, c 是散热盘的比热。但要注意, 这样求出的 $\Delta T / \Delta t$ 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 $2\pi R_c^2 + 2\pi R_c h_c$ (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:

$$\left.\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right|_{C_{\text{散热}}} = mc\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{T_2} \frac{(\pi R_c^2 + 2\pi R_c h_c)}{(2\pi R_c^2 + 2\pi R_c h_c)} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (3), 得:

$$\lambda = mc\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{T_2} \frac{(R_c + 2h_c)h_B}{(2R_c + 2h_c)(T_1 - T_2)} \frac{1}{\pi R_B^2} \quad (7)$$

【实验仪器】

本实验仪器装置及其配件包括: TC-3 型导热系数测试仪 (图 2a: 样品架; 图 2b: 测试仪), 游标卡尺, 橡胶盘, 胶木盘等。仪器采用低于 36V 的隔离电压作为加热电源。发热盘 (A 盘) 可上下升降, 发热盘和散热盘 (C 盘) 的侧面各有一小孔, 可插入铂电阻温度传感器。散热盘放在可调节的三个螺栓 (接触点隔热) 上, 可使待测样品盘 (B 盘) 的上下两个表面与发热盘和散热盘紧密接触, 散热盘下方有一个轴流式风扇, 在需要快速降温时用来强制散热。插在发热盘小孔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盘或发热盘的侧面小孔内。两个铂电阻温度传感器的温度值 (PV1 和 PV2) 可由液晶显示屏读出。



图 2a 导热系数测试仪-样品架



图 2b TC-3 型导热系数测试仪

【实验内容】

内容 1：游标卡尺测量散热盘 C 和待测样品盘 B 的直径、厚度。

内容 2：观测和记录升温过程和稳态温度。

内容 3：散热铜盘冷却曲线的测量。

【实验步骤与要求】

内容 1：游标卡尺测量散热盘 C 和待测样品盘 B 的直径、厚度的测量。

选择不同位置，各测量五次，取平均值。

内容 2：观测和记录升温过程和稳态温度。

1. 连接导线：实验时，将控温电源线、温度控制信号线、电机/风扇线连接到测试主机对应位置。两个铂电阻测温传感器分别连接测试仪主机 PV1 和 PV2。

注：同一环境下，2 个传感器测得温度应该一致。如果不一致，需要测量之前，对传感器的温度进行标定（2 个传感器顶端接触，记录其温度差，数据处理时进行修正）。

2. 安装待测样品：支架上先放散热铜盘 C，再放待测样品盘 B，发热铝盘 A 放在盘 B 上。调节三个螺栓，使三个盘密切接触。两个铂电阻测温传感器分别插入发热铝盘 A 和散热铜盘 C 侧边小孔中。**注意：安装前必须将三个螺栓调松；安装后检查三个盘是否密切接触。**

3. 设置加温上限温度：打开测试仪后面板电源开关，液晶屏上点击“进入”，液晶屏右上角（SV）设置上限温度例如如 60℃。**注意：上限温度不要超过 80℃。**

4. 观测升温过程和稳态温度：加热电流选择“**低**”档，液晶屏右上角按下“**启动**”，系统开始根据内部加热程序对发热盘进行升温及控温。液晶屏按下**计时键**，每隔 2 分钟记录发热铝盘 A 和散热铜盘 C 的温度。当盘 A、盘 C 温度保持稳定后（大约 60 分钟），继续每隔 2 分钟记录盘 A 和盘 C 的温度，测量 5 组，其平均值作为其稳态温度 T_1 和 T_2 。

内容 3：散热铜盘冷却曲线的测量。

移去样品盘 B，发热盘 A 与散热盘 C 直接接触。先将 C 盘温度上升到高于稳态 T_2 值若干摄氏度（例如 4-5℃左右）后，移开发热盘 A，散热盘 C 自然冷却。测量其温度 T 随时间 t 的变化关系（每隔 30 秒记录 1 次），当温度下降到 T_2 附近后，继续记录 5-6 组数据。

【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. 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（逐差法，选择 T_2 附近上下各 5 组数据）；计算出样品材料的导热系数，并求出不确定度（要求有过程，注意单位和有效数字），给出结果表达式。**注：本实验只考虑冷却速率的误差。**

3. 作 A 盘和 C 盘的升温曲线，并解释热传导的规律，分析误差的原因；作散热盘 C 温度随时间变化的冷却曲线。计算机软件作图或坐标纸作图皆可（**坐标纸作图用铅笔**）。**注意作图规范：图名/横竖坐标/单位/坐标范围及比例/数据点。**

【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 侧面的小孔时应插到孔洞底部，避免因传感器接触不良，造成温度测量不准。操作过程中注意防止高温烫伤。

2. 实验中，取出被测样品时，应先旋松加热圆筒上端的固定螺钉。样品取出后，小心

将发热铝盘降下，使发热铝盘 A 与散热铜盘 C 接触，重新拧紧固定螺钉。

3. 实验前，要标定一下两测温传感器的读数，若不一致，数据处理时要进行修正。

【拓展思考】

1. 根据学过的电学知识，写出对应热传导定律的电流密度的表达式。
2. 测量冷却速率时，为什么要在稳态温度附近选取测量值？

【重点难点】

热传导达到平衡时，样品盘的传热速率与散热盘的散热速率保持动态的平衡。此时发热盘和散热盘的温度，分别对应于样品盘上表面和下表面的温度。另外，在考虑散热盘散热时，需考虑其上表面被样品盘覆盖，需要引入比例因子。

【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.

【附录 1】实验数据记录表格

表 1：散热盘和样品盘的几何参数（散热盘 C 质量 $m=$ _____g）

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

表 2：观测升温过程并记录 A 盘和 C 盘温度（每隔 2 分钟）。达到基本稳态后（10 分钟内，散热盘 C 温度变化在 0.3-0.5℃以内），继续记录 5 组数据。

测量次数									
时间 t (s)									
A 盘 T (°C)									
C 盘 T (°C)									

稳态温度记录（最后 5 组平均值）（ $\bar{T}_1 =$ _____°C， $\bar{T}_2 =$ _____°C）

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 (s)									
C 盘 T (°C)									

注：降温前，C 盘加热至 T_2 以上 4-5℃左右；温度降到 T_2 附近后，继续记录 5-6 个数据。