

测定不良导体的导热系数

导热是热交换三种基本形式之一，是工程热物理、材料科学、固体物理及能源、环保等各个研究领域的课题之一，要认识导热的本质和特征，需了解粒子物理。材料的导热机理在很大程度上取决于它的微观结构。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。在金属中电子流起支配作用，在绝缘体和大部分半导体中则以晶格振动起主导作用。目前，对导热机理的理解大多数来自固体物理的实验。

导热系数是反映材料热性能的物理量。它不仅是评价材料的重要依据，而且是应用材料时的一个设计参数，在加热器、散热器、传热管道设计、房屋设计等工程实践中都要涉及该参数。材料的导热系数不但可以随温度和压力变化，而且也明显受到材料的杂质含量、结构变化影响。因此，在科学实验和工程技术中常用实验的方法测定材料的导热系数。

1882 年法国科学家傅立叶建立了热传导理论。目前各种测量导热系数的方法都是以傅立叶热传导定律为基础。测量方法分为两大类：稳态法和动态法。本实验采用的是稳态平板法。

【实验目的】

- 1、了解热传导现象的物理过程。
- 2、掌握一种通过热电转换方式测量温度的方法。
- 3、学会应用稳态平板法测量不同材料的导热系数。

【实验原理】

稳态平板法是一种常用来测定不良导体导热系数的方法。在 1898 年 U·H·Lees 首次使用，因而又叫李氏法。在本方法中，样品被制成平板形，如图 1 中所示。其上表面与一个稳定的均匀发热体（上铜盘）相接触，下表面与一个均匀的散热体（下铜盘）相接触。由于平板样品的侧面积比平板平面小很多，可以认为热量只沿上下方向垂直传递，横向由侧面散去的热量可以忽略不计，在样品内只在垂直样品平面的方向上有温度梯度，在同一平面上，各处的温度相同。



图 1 导热系数测试仪及实验用品

为了测定材料的导热系数，首先从它的定义式及其物理意义入手。如果热量是沿着 Y 方向传导，如图 2 所示。以 $\frac{T_1 - T_2}{h}$ 表示在 Y 轴上任一位置 Y_0 处的温度梯

度, 以 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 表示在该处的传热速率 (单位时间内通过截面积 S 的热量). 设稳态时, 样品的上下平面温度分别为 T_1 、 T_2 . 根据热传导定律可知, 在时间 Δt 内通过平板样品的热量 ΔQ 则为:

$$\Delta Q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{h} S \Delta t \quad (13-1)$$

式中比例系数 λ 为导热系数. 可见导热系数的物理意义: 在温度梯度为一个单位的情况下, 单位时间内垂直通过单位面积截面的热量.

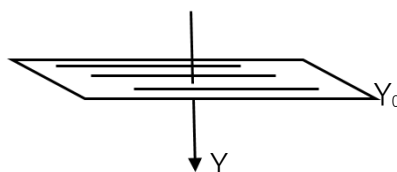


图2 传导方向示意图

利用式 (13-1) 测量材料的导热系数 λ 需解决两个关键问题: 一个是在材料内造成一个温度梯度, 确定其数值; 另一个是测量材料内由高温区向低温区的传热速率. 为了在样品内形成一个温度梯度分布, 可以把样品加工成平板状, 并把它夹在两块良导体——铜盘之间 (如图3所示), 使两片铜盘分别保持在恒定温度 T_1 和 T_2 , 就可能在垂直于样品表面的方向上形成温度的梯度分布. 样品厚度可做成 $h \leq D$ (D 为样品直径). 这样, 由于样品侧面积比平板面积小得多, 通过侧面散去的热量可以忽略不计, 可以认为热量是沿垂直于样品平面的方向上传导, 即只在此方向上有温度梯度. 由于铜是热的良导体, 在达到平衡时, 可以认为同一铜盘各处的温度相同, 样品内同一平行平面上各处的温度也相同. 这样只要测出样品的厚度 h 和两片铜盘的温度 T_1 、 T_2 , 就可以确定样品内的温度梯度. 这需要铜盘与样品表面的紧密接触, 无缝隙, 否则中间的空气层将产生热阻, 使得温度梯度测量不准确. 为了保证样品中温度场的分布具有良好的对称性, 把样品及两片铜盘都加工成等大的圆形.

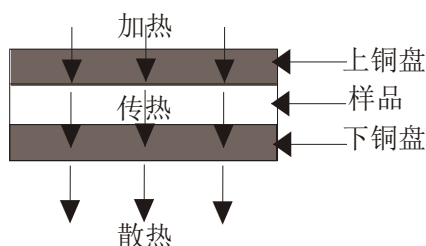


图3 样品位置示意图

单位时间内通过一截面积的热量是一个无法直接测定的量, 我们设法将这个量转化为较为容易测量的物理量. 为了维持一个恒定的温度梯度分布, 必须不断给上铜盘加热. 热量通过样品传到下铜盘, 下铜盘则要将热量不断地向周围环境散出. 当加热速率、传热速率与散热速率相等时, 系统就达到一个动态平衡状态, 称之为稳态. 此时下铜盘的散热速率就是样品内的传热速率. 这样, 只要测量下铜盘在稳态温度 T_2 时散热的速率, 也就间接测量出了样品内的传热速率. 但是, 下铜盘的散热速率也不易测量, 还需要进一步作参量转换. 可以知道下铜盘的散热速率与其冷却速率 (温度变化率 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$) 有关, 关系式为:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} |T_2 = mc \frac{\Delta T}{\Delta t} |T_2 \quad (13-2)$$

式中的 m 为下铜盘的质量（单位为克），具体值已经标示在它的侧面，实验前请把它记录下来。 C 为下铜盘的比热。这样就把测量下铜盘的散热速率又转化为测量下铜盘的冷却速率。下铜盘的冷却速率测量方法：在达到稳态后，抽出硅胶样品盘，用上铜盘直接对下铜盘加热，使其温度高于稳态值 T_2 （高出 1mV 左右），再让其在环境中自然冷却，直到温度低于 T_2 。

综上所述，得到导热系数的公式如下：

$$\lambda = \frac{mc}{S} \frac{h}{T_1 - T_2} \frac{\Delta T}{\Delta t} |_{T_2} \quad (13-3)$$

$$= \frac{mch}{\pi R^2} \frac{1}{T_1 - T_2} \frac{\Delta T}{\Delta t} |_{T_2} \quad (13-4)$$

式中， λ 为样品的导热系数； h 为样品的厚度； S 为样品平面的面积；本实验样品呈圆形。设圆盘样品的半径为 R ，即 $S = \pi R^2$ 。

【实验仪器】

YBF-2 型导热系数测试仪，硅胶圆盘（样品），木绝热圆盘，参考温度源，样品夹。

【实验内容】

- 1、已知参数：下铜盘的比热 $C = 380\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ 、样品半径 $R = 6.45 \times 10^{-2}\text{m}$ 、样品厚度 $h = 8.05 \times 10^{-3}\text{m}$ 、 $\pi = 3.14$ ，下铜盘的质量 m 已在盘侧面标示，请自己查看并记录。
- 2、摆放圆盘时，须使放置热电偶的洞孔与温度参考源在同一侧。热电偶插入上下铜盘的小孔时，要抹上些硅脂，并插到洞孔底部，使热电偶测温端与铜盘接触良好，热电偶冷端插在参考温度源小孔中。
- 3、检查线路，开机预热。电源开关在测试仪机身后部右侧。打开风扇，保证其在实验过程中一直处于工作状态。
- 4、根据稳态平板法，一般采用自动控温（设置值已定为 100.0°C ）。控制方式开关拨至“自动”，手动控制拨至中间位置。信号选通端指向 I，待上铜盘温度稳定后，信号选通端指向 II，观察下铜盘的温度变化。每隔 60 秒记录上下铜盘温度示值（电压值）填入表格 1 中。如在一段时间内（约 4 分钟）下铜盘电压示数波动小于等于 0.01 毫伏，或者连续三组下铜盘电压示数波动小于等于 0.01 毫伏，即可认为已达到稳定状态，把最后一组数据作为稳态时 T_1 、 T_2 值记到表格 2 中。此时温度梯度可以计算。温度稳定需要 40 分钟左右，具体时间与被测样品材料、目标温度及环境温度的不同有关。
- 5、用样品夹移去样品，调节底部螺丝使上下铜盘对齐贴紧。继续对下铜盘加热，当下铜盘温度比稳态 T_2 高出 1 毫伏左右时，停止加热。抬起发热体固定，用样品夹把木质绝热盘覆盖到下铜盘的上表面，只通过下表面散热（侧面散热忽略），让下铜盘自然冷却。每隔 30 秒读一次下铜盘的温度示值并记录表格 3 中，直至温度下降到 T_2 以下一定值。选取邻近稳态 T_2 值的两个数据做差，求出冷却速率 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ 。
- 6、根据式（13-3）或式（13-4）计算样品的导热系数 λ 。

【注意事项】

- 1、加热样品时，为达到稳定的传热，应调节底部的三个微调螺丝，使样品与上铜盘、下铜盘紧密接触，中间不要有空气隙；也不要将螺丝旋太紧，以影响样品的厚度。
- 2、应该用样品夹拿取加热后的样品，不能徒手，防止烫伤。不要划伤样品表面。
- 3、离开实验室前应恢复整理仪器，打扫好卫生，关闭电源后再离开。
- 4、注意单位换算，冷却速率与导热系数有效数字位数保留三位。
- 5、数据处理必须有计算过程。

【思考题】

1. 实验中要求风扇始终开着，不能时开时关，这说明什么问题？
2. 木质绝热圆盘在本实验中起什么作用，若不覆盖会对结果有什么影响？
3. 如何利用测得的数据去计算下铜盘在 T_2 时的散热速率？
4. 如何画出包含本实验核心内容的思维导图？

【原始数据表格示范】

参数： $h=8.05\times 10^{-3}m$ ； $R=6.45\times 10^{-2}m$ ； $C=380J/(Kg\cdot K)$ ； $\pi=3.14$ 。

下铜盘的质量 m 已在盘侧面标示，请自己查看并记录。

表 1 寻找稳态值过程中的数据

$\begin{matrix} t \\ T \end{matrix}$	0	60	120	180	240	300	360	420	...
上表面 T_1									
下表面 T_2									

{t 代表时间（秒）， T 代表温度，稳定后停止记录，稳定值填入表 2}

稳态时（传热速率等于散热速率）

表 2 稳态值数据

样品上表面温度稳态值 T_1 (mV)	样品下表面温度稳态值 T_2 (mV)

（备注：电动势值代表温度值）

表 3 冷却过程中寻找邻近稳态值 T_2 的数据

t (S)	0	30	60	90	120
T_2' mV						$>T_2$	$>T_2$	$<T_2$

(最后一个测量值必须小于表格 2 中稳态值 T_2 才可以停止数据记录)

【数据处理】

1、利用表格 3 的数据计算：

冷却速率 $\left| \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T_2} = \frac{(\quad) - (\quad)}{(\quad) - (\quad)} = \underline{\hspace{2cm}}$ (标出具体的国际单位)

2、代入已知参数和结果计算：

导热系数：

$$\begin{aligned}
 \lambda &= mc \left| \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T_2} \left| \frac{h}{T_1 - T_2} \frac{1}{\pi R^2} \right| \\
 &= \frac{mch}{\pi R^2} \frac{1}{T_1 - T_2} \left| \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T_2} \\
 &= \dots \\
 &= \underline{\hspace{2cm}} \text{ (标出具体的国际单位)}
 \end{aligned}$$