

固体导热系数的测定

导热系数是表征物质热传导性质的物理量，对保温材料要求其导热系数尽量小，对散热材料要求其导热系数尽量大。由于导热系数与物质成分、微观结构、温度、压力及杂质含量密切相关，所以在科学实验和工程设计中材料的导热系数常常需要由实验去具体测定。

测量导热系数的实验方法一般分为稳态法与动态法两类。在稳态法中，先利用热源对样品加热，样品内部的温差使热量从高温处向低温处传导，样品内部各点的温度将随加热快慢和传热快慢的影响而变动；当适当控制实验条件和实验参数，使加热和传热过程达到平衡状态时，待测样品内部就能形成稳定的温度分布，根据这一温度分布就可计算出导热系数。而在动态法中，最终在样品内部所形成的温度分布是随时间变化的，例如呈周期性的变化，变化的周期和幅度亦受实验条件和加热快慢的影响。本实验将利用稳态法测量固体的导热系数。

【实验目的】

1. 了解热传导的基本规律及散热速率的概念。
2. 掌握稳态法测定导热系数的方法。

【实验仪器】

FD-TC-II 型导热系数测定仪，数字电压表，热电偶，制冷仪，游标卡尺，夹子，计时表（自备）等。

【实验原理】

当温度不同的两物体接触或一个物体内部各处温度不均匀时就会发生热传导现象。1882 年法国数学、物理学家约瑟夫·傅立叶给出了热传导的基本公式（傅立叶方程）

$$dQ = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) dS dt \quad (7.1)$$

式中， dQ 表示在 dt 时间内通过 dS 面元传递的热

量， $\frac{dT}{dx}$ 是沿 dS 面元法线处的温度梯度， k 为物质的导热系数。负号表示热量传递方向与温度梯度的方向相反。

图 7.1 为厚度为 h ，面积为 S 的圆柱形样品。若维持其上下表面为恒定的温度 T_1 和 T_2 ($T_1 > T_2$)，侧面绝热，根据(1)式，则在 Δt 时间内沿 S 法线方向从上向下传递的热量为

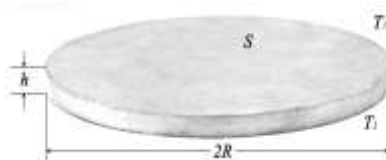


图 7.1 测量样品

$$\Delta Q = k \frac{T_1 - T_2}{h} S \Delta t \quad (7.2)$$

由此可得材料的导热系数

$$k = \frac{h}{S(T_1 - T_2)} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (7.3)$$

式中, $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 为样品材料沿 S 法线方向的传热速率。样品的 h , S 及上下表面的温度 T_1 和 T_2 容易测出, 问题的关键是测定 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 。因为稳定导热时, 样品的传热速率和散热速率是相等的, 故在实验中增加一个紧贴样品的散热盘, 其在稳定导热时的散热速率即为 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 。

图 7.2 为实验仪器装置图。三个螺旋头支撑着一个铜散热盘 D , 其上放置一个圆盘状待测样品 C , 样品 C 上安放一发热盘 B 。实验时发热盘 B 直接将热量通过样品上表面传入样品 C , 散热盘 D 及电扇有效稳定地散热, 使传入样品的热量不断从样品的下表面散出。由于发热盘 B 与散热盘 D 为良导体, 且 B 的下表面、 D 的上表面与样品盘 C 的上、下表面密切贴合, 故可以认为样品盘 C 上、下表面的温度分别与 B 、 D 盘的温度相同。当传入样品盘 C 的热量等于它散出的热量时, 样品处于稳定导热状态, 这时发热盘 B 与散热盘 D 的温度为定值(T_1 和 T_2)。

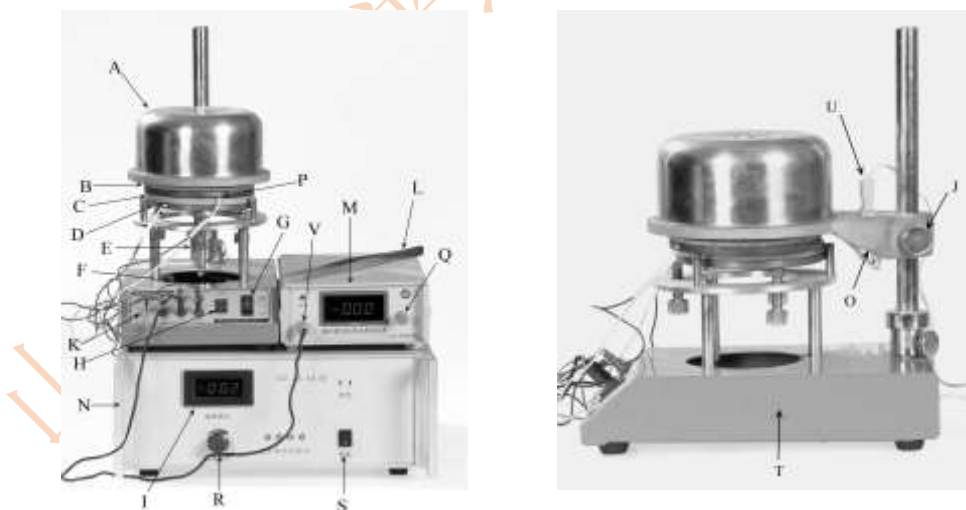


图 7.2 稳态法测定导热系数实验装置图

A-电热板盒 B-发热盘 C-待测样品 D-散热盘 E-螺旋头 F-风扇 G-加热开关 H-风扇开关 I-制冷仪温度显示 J-加热器固定旋钮 K-热电偶选择开关 L-镊子 M-数字电压表 N-电子制冷仪 O-加热器支撑梁 P-热电偶 Q-数字电压表调零旋钮 R-制冷仪温度调节 S-制冷仪电源开关 T-仪器底座 U-加热器 220V 电源插座 V-数字电压表输入插座

测出稳定导热时的 T_1 和 T_2 ，然后抽出样品盘 C，让发热盘 B 的底面与散热盘 D 直接接触，使 D 的温度上升 20°C 左右，移去加热盘 B，将样品盘 C（样品为金属时用绝缘板）覆盖在散热盘 D 上，使之自然散热。测出散热盘在 T_2 附近的冷却速率，可取为

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{T=T_2} = C_2 m_2 \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \quad (7.4)$$

式中， C_2 ， m_2 分别为散热盘 D 的比热容和质量。

由(7.4)式估算散热速率时，计入的散热面为散热盘的上、下表面和侧面，即它的总面积为 $2\pi R_2^2 + 2\pi R_2 h_2$ 。实验中稳态传热时，散热盘的上表面被样品盘覆盖，其实际散热面积为 $\pi R_2^2 + 2\pi R_2 h_2$ 。考虑到物体的散热速率与它的散热面积成正比，将(7.4)式修正为

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{T=T_2} = C_2 m_2 \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \cdot \frac{\pi R_2^2 + 2\pi R_2 h_2}{2\pi R_2^2 + 2\pi R_2 h_2} \quad (7.5)$$

即为稳定导热状态下样品材料的传热速率。

本实验采用热电偶与数字电压表来测量样品上、下表面的温度。记热电偶的温差系数为 α ，当热电偶的高、低温端温度为 T 和 T_0 时，其温差电动势 $E = \alpha(T - T_0)$ 。保持冷端 $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，则 $E = \alpha T$ ，于是有

$$T_1 = E_1 / \alpha \quad T_2 = E_2 / \alpha \quad (7.6)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\alpha \Delta t} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (7.7)$$

把(5)，(6)，(7)式带入(3)式得

$$k = \frac{C_2 m_2 h (R_2 + 2h_2)}{2\pi R^2 (R_2 + h_2) (E_1 - E_2)} \cdot \left. \frac{\Delta E}{\Delta t} \right|_{E=E_2} \quad (8)$$

式中， R 为样品盘的半径， E_1 、 E_2 为稳定导热时样品盘上、

下表面的温差电动势， $\left. \frac{\Delta E}{\Delta t} \right|_{E=E_2}$ 为稳定导热时，散热盘温

差电动势在 E_2 附近的下降速率。

当测量金属的导热系数时， T_1 和 T_2 的值为稳定导热时金属样品上下表面的两个温度(金属样品上下表面有可供插热电偶的小孔，如图 7.3 所示)，此时散热盘 D 的温度记

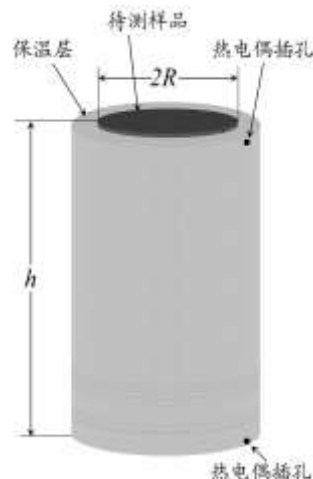


图 7.3 良导体样品示意图

为 T_3 。测 T_3 的值时, 可在 T_1 和 T_2 值达到稳定时, 将上面测 T_1 或 T_2 的热电偶移下来测量。此时有

$$k = \frac{C_2 m_2 h (R_2 + 2h_2)}{2\pi R^2 (R_2 + h_2) (E_1 - E_2)} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta t} \Big|_{E=E_3} \quad (7.8')$$

【实验内容】

1. 熟悉实验装置结构。如图 7.4 所示, 将待测样品放在发热盘 B 和散热盘 D 之间, 松紧适中。

2. 参照图 7.2、图 7.5 连接好仪器。发热盘 B 和散热盘 D (或待测金属的上、下端) 侧面都有供安插热电偶的小孔, 将热电偶的高温端尽量深地插入小孔, 低温端插入制冷仪后面板的制冷输出孔, 如图 7.6 所示。

3. 数字电压表调零。打开数字电压表的电源开关, 将数字电压表与导热系数测定仪的连线在数字电压表端 V 断开, 旋转调零旋钮 Q 调零, 然后再接好连线。

4. 将导热系数测定仪的电源开关 G 打到 220V 位置, 给发热盘 B 加热。打开风扇电源 H。通过切换 K 键, 用数字电压表跟踪发热盘 B 和散热盘 D 的温度变化 (显示为毫伏数), 其中读数变化较快者为发热盘 B 的温差电动势。当发

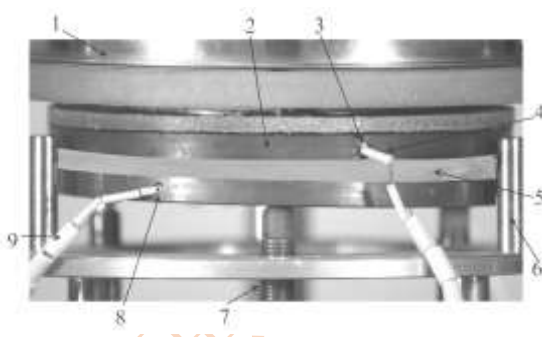


图 7.4 待测样品的放置

1. 加热器 2. 加热盘 3. 发热盘热电偶放置孔
4. 发热盘热电偶 5. 待测样品 6. 样品限位立柱
7. 升降调节旋钮 8. 散热盘 9. 散热盘热电偶



图 7.5 仪器接线示意图

1. 热电偶选择切换开关 2. 接热电偶 1 3. 接数字电压表
4. 接热电偶 2 5. 风扇开关 6. 工作指示灯 7. 加热开关



(a) 前面板



(b) 后面板

图 7.6 电子制冷仪

热盘 B 的温差电动势达到 4.00mV 时,将导热系数测定仪的电源开关 G 打到 110V 位置,继续对发热盘 B 加热。

5. 电压降至 110V 后,每隔 5 分钟读取一次样品上、下表面的温差电动势 ε_1 和 ε_2 (通过调节电键 K 切换),记录在表 7.1 中。测得若干组数据后,注意将每组数据与上一组相比较,若相邻两次读数相差不大 ($<0.03\text{mV}$),则可认为达到稳定导热状态,此时上、下表面的温差电动势读数分别记作 E_1, E_2 。

6. 抽出样品盘 C,让加热盘 B 紧贴散热盘 D 继续加热。转动三个螺旋头 E,使散热盘 D 下降,用夹子将样品 C 取出,放在绝热板上,然后再转动三个螺旋头 E,使散热盘 D 上升至紧贴加热盘 B,将导热系数测定仪的电源开关 G 打到 220V 位置,继续加热,同时用电压表跟踪散热盘 D 的温度变化(显示为毫伏数)。

7. 当电压表的示数比稳定导热时的值(E_2)大 0.8mV 时,断开电源(将导热系数测定仪的电源开关 G 打到中间位置),迅速转动三个螺旋头 E,降低散热盘 D(与发热盘间距 1 厘米以上),使散热盘 D 自然冷却。每隔 30 秒读取一次散热盘 D 的电动势 ε_2' ,直到比稳定的 E_2 低 0.8mV,将数据记录在表 7.2 中。关闭风扇电源开关,关闭数字电压表的电源开关。

8. 用游标卡尺测出样品盘和散热盘的半径 R 和 R_2 ,厚度 h 和 h_2 。散热盘的质量 $m_2=1.000\text{kg}$,比热容 $C_2=3.77\times 10^2\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ 。

9. 在毫米方格坐标纸上作散热盘在散热过程中的 $\varepsilon_2' \sim t$ 曲线,求出该曲线 $\varepsilon_2'=E_2$ 处切线的斜率 $\left. \frac{\Delta E}{\Delta t} \right|_{E=E_2}$ (若为金属, $\varepsilon_3=E_3$, 此时 $\left. \frac{\Delta E}{\Delta t} \right|_{E=E_3}$)。

10. 根据(6.8)或(6.8')式计算被测样品材料的导热系数 k 。

【数据记录及处理】

表 7.1 升温

t (min)	0	5	10	15	20	-----
ε_1 (mV)						
ε_2 (mV)						

稳态值 $E_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ mV $E_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ mV ($E_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ mV)

表 7.2 散热盘降温

t (s)	0	30	60	90	120	-----
ε_2' 或 ε_3' (mV)						

测量值 $R = \underline{\hspace{2cm}}$, $h = \underline{\hspace{2cm}}$, $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$, $h_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

【注意事项】

1. 导热系数测定仪的发热盘由支架固定，不要将仪器顶部的电热盒取下，或将手伸到加热器支撑梁底下，以防触电或烫伤。
2. 要保护热电偶，热电偶的冷端应插入制冷仪的冷端，并尽量灌入适量的硅油。热电偶的高温端应蘸些硅油，并尽量深地插入小孔，切忌不要用力扯拽。
3. 升降散热盘时要快，尽量保持散热盘和发热盘平行，在两盘紧贴时，螺旋头的松紧应适度。
4. 风扇在实验过程中一直保持运行。
5. 实验完毕，关闭电源开关，拔下电源线。

【思考题】

1. 环境温度的变化会给实验结果带来什么影响？
2. 为什么要求出散热盘在 $\varepsilon_2' = E_2$ 时温差电动势的下降速率？
3. 用 (8) 式计算导热系数 k 时要求哪些实验条件？在实验中如何保证？
4. 观察实验过程中环境温度的变化，分析实验过程中各个阶段环境温度的变化对结果的影响。

【应用提示】

1. 关于热电偶

热电偶测温具有传统玻璃温度计无法比拟的优势。热电偶的特点：热容量小，对待测环境影响小；测温范围宽，可从零下上百度到零上上千度；将热学量（温度）直接转换为电学量（电动势），使自动测量和控制非常方便。因此，热电偶在各领域中应用十分普遍。

本实验选用铜—康铜热电偶测温度，温差 100°C 时，其温差电动势约为 4.2mV ，故应配用量程 $0\sim 10\text{mV}$ 并能读到 0.01mV 的数字电压表。

2. 建筑节能保温隔热材料及其应用建议

随着建筑节能工作的纵深发展，对节能保温隔热材料的要求越来越高。选择适合的保温隔热材料不仅能达到节能保温的目的，还能延长建筑物的寿命，反之影响甚至缩短建筑物的寿命。

保温隔热材料的保温主体可以是发泡型聚苯乙烯板，挤出型聚苯乙烯板，岩棉板，玻璃棉板等不同材料。在使用前要测试以下与保温性能有直接关系的物理量：

1、导热系数 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)：这一技术指标是关系工程保温效果的关键指标，一般而言，实验室的测试是在板材烘干至恒重时测试的，而材料的应用是在空气中含有湿度的条件下使用的，因此，使用时要乘以一定的系数；或者，直接将材料调整到使用环境条件下测试。

2、表观密度 (Kg/m^3)：材料的表观密度在一定程度上影响其导热系数，表观密度不合格的材料将直接导致其物理性能下降，如强度，尺寸稳定性等。

保温板必备的物理性能：密度 $61\sim 200\text{Kg/m}^3$ ；导热系数（平均温度 70°C ） ≤ 0.041 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)。