



实验二十四

闪光法测定不良导体的热导率

Bryan 1500000000

1 数据及处理

1.1 样品的密度和比热容

通过测量样品的质量和几何尺寸, 计算得到其密度。测定数据及结果如下:

表 1: 样品密度测定数据表

胶布板	L/cm	W/cm	H/mm	V/cm^3	m/g	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1	9.90	9.89	3.080			
2	9.91	9.88	3.085			
3	9.90	9.90	3.075			
均值	9.90	9.89	3.080	30.17	41.02	1.36

瓷砖	L/cm	W/cm	H/mm	V/cm^3	m/g	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1	10.00	10.02	0.90			
2	9.95	10.00	0.85			
3	10.05	10.01	0.88			
均值	10.00	10.01	0.88	87.75	214.58	2.45

样品的比热容 c 和被照射样品的厚度 h 均已事先测定, 有:

表 2: 样品的已知参量表

样品	$c/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	h/m
胶布板	1.04×10^3	3.02×10^{-3}
瓷砖	0.71×10^3	3.03×10^{-3}



1.2 温升曲线的特征量

记录闪光照射样品后的温升曲线, 记录初始温度 T_0 , 最高温度 T_M , 计算 $T_{1/2} = \frac{1}{2}(T_0 + T_M)$, 读取对应的时间 $t_{1/2}$, 从而得到热导率:

$$\lambda = \frac{1.38}{\pi^2} \frac{\rho c h^2}{t_{1/2}} \quad (1)$$

可利用每次测定结果分别计算 λ , 也可利用修正散热后特征时间的均值 $\bar{t}_{1/2}$ 代入计算, 结果总结如下。

表 3: 胶布板热导率测定数据表

多次测量	散热修正 / $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	T_0/K	T_M/K	$T_{1/2}/\text{K}$	$t_{1/2}/\text{s}$	$\lambda/\text{W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$
1	0	0.7987	1.1689	0.9838	6.7587	0.267
1'	0.001243	0.7987	1.1949	0.9968	6.8973	0.261
2'	0.001399	0.7326	1.0898	0.9112	7.0282	0.257
3'	0.001258	0.6922	1.1477	0.9199	6.9336	0.260
$t_{1/2}$ 均值	0.001300	—	—	—	6.9530	0.259
λ 均值	0.001300	—	—	—	—	0.259

首先, 看已加粗的最终测定数据, 可见先计算 $\bar{t}_{1/2}$ 再代入得 λ , 和先分别计算 λ 再平均得 $\bar{\lambda}$, 这两种方式得到的测定值没有显著不同。

此外, 将散热修正前后的 λ 测定值标注在数轴上, 比较如下:

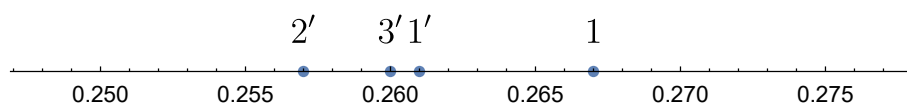


图 1: 散热修正对 λ 测定值的影响

可见散热修正后的各测定值基本一致, 而散热修正前的测定值显著偏大, 这表明散热修正也是十分必要的。

对瓷砖样品重复上述步骤, 同时调整并记录每一组数据的采样时间, 结果如下。



表 4: 瓷砖热导率测定数据表

多次测量	采样时间 / s	散热修正 / $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	T_0/K	T_M/K	$T_{1/2}/\text{K}$	$t_{1/2}/\text{s}$	$\lambda/\text{W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$
1	38	0	0.2013	0.5730	0.3087	4.0529	0.550
1'	38	0.001506	0.2011	0.6071	0.4041	4.3090	0.517
2'	33	0.001350	0.2664	0.6644	0.4655	4.2150	0.529
3'	30	0.001439	0.2283	0.6433	0.4358	4.1984	0.531
$t_{1/2}$ 均值		0.001432				4.2408	0.526
λ 均值		0.001432					0.526

在瓷砖样品的三次测定中, 单调地减小了采样时间, 但相应的散热修正系数并不是单调变化的, 且差距不很显著; 由此猜想, 采样时间对软件自动散热修正的影响有限; 对自动散热修正影响最为显著的可能是热噪声及其他因素。

2 分析与讨论

2.1 关于散热修正的进一步分析

软件通过记录温升曲线的峰值和后续散热曲线的终点, 以这两点确定的直线斜率为散热修正系数 k , 进一步令 $T' = T - kt$ 得到散热修正后的曲线。

下面考察这一过程的合理性。首先, 考虑理想化的模型, 满足绝热条件, 记温变曲线为 $T(x, t)$, 且脉冲对初始温度的影响为:

$$T(x, 0) = \delta(x) \quad (2)$$

为便于讨论, 可将有关参量无量纲化, 如取样品厚度 $h = 1$; 记热扩散率为 α , 则有:

$$T(1, t) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 \tau}, \quad \tau = \alpha t, \quad \lambda = \alpha \rho c \quad (3)$$



相应地，脉冲在介质中的传导如下所示：

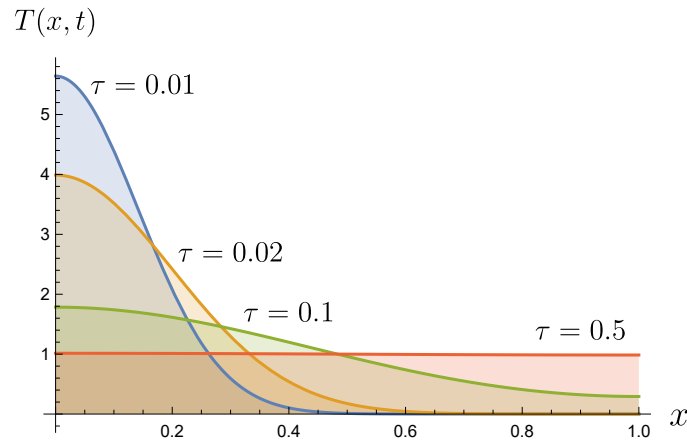


图 2: 热脉冲在一维介质中的传导

由上图可见，热流传递的过程很像一个中心位于原点的不断扩散的高斯波包。

若考虑样品在前后两面的散热，则可以将边界 Σ 上的条件修正为：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} + hT \right)_{\Sigma} = 0 \quad (4)$$

其中 h 待定，它表征了散热的强度；这里忽略了前后表面 h 值的不同。此时，要获得方程的解析解就较为困难了，但可以考虑用数值方法求解方程。受到上述导热图像的启发，可以取初始温度分布为高斯型分布：

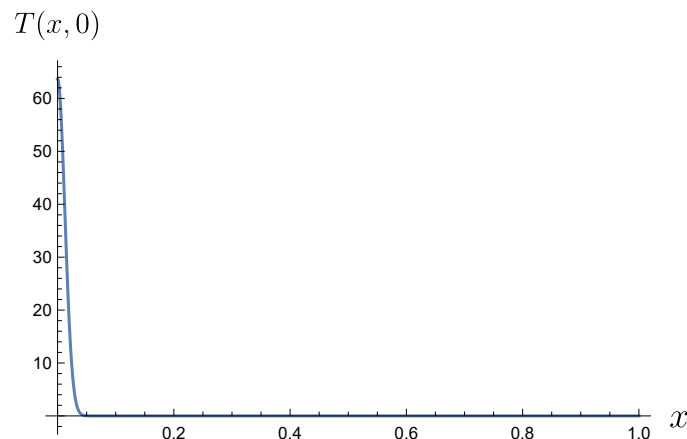


图 3: 初始温度分布曲线

采用 *Mathematica* 内置的正态分布函数: `PDF[HalfNormalDistribution[a], x] /. {a -> 55}`



数值求解热传导方程，首先比较 $h = 0$ 情况下数值解与解析解的差异：

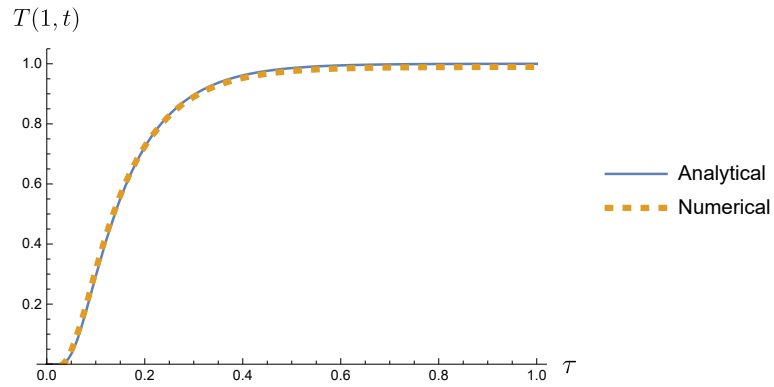


图 4: 绝热情形数值解 (Numerical) 与解析解 (Analytical) 的比较

可见两者基本一致；进一步对 $h = 0.03$ 求解方程，可得：

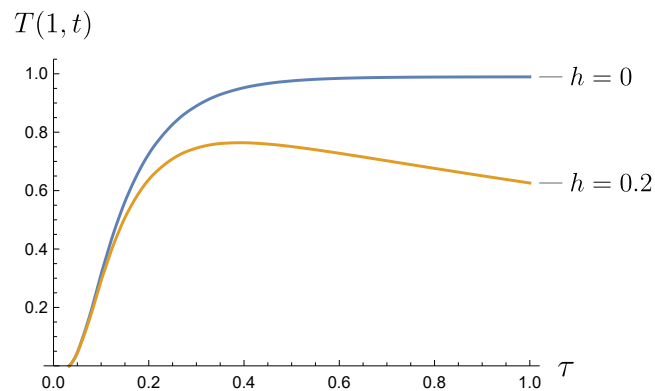


图 5: 绝热情形与考虑散热情形的数值解之比较

可见，数值解与实测曲线的模式完全一致。事实上，对胶布板，经过线性缩放调整后，可使数值计算结果与温变曲线基本吻合：

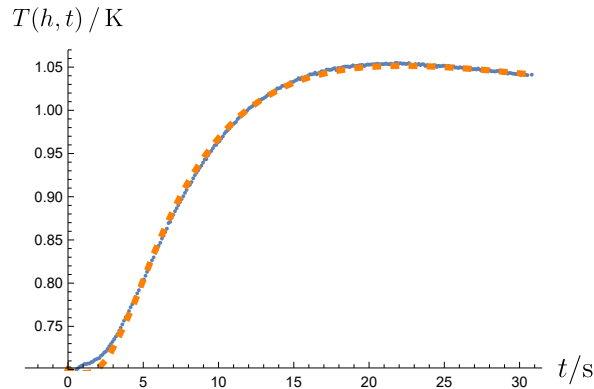


图 6: 实测温变曲线与数值计算结果（虚线）之比较

在此基础上，分析散热对温变曲线的影响；图 5 中两条曲线的差异如下：

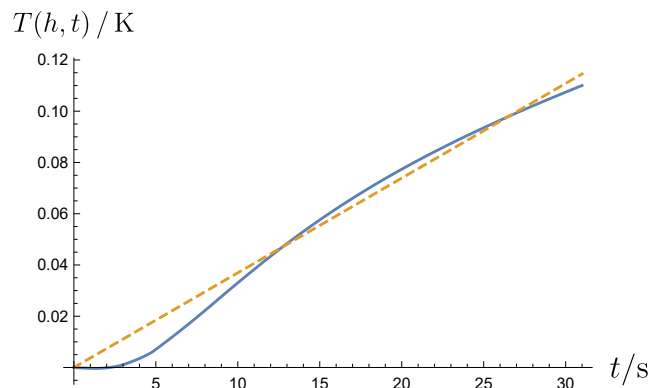


图 7: 散热修正的数值计算结果

可见温度差异关于时间确实具有不错的线性特征；在曲线上等间隔取样，计算可得相关性系数约为 0.994854.

由此可见，对全过程进行线性散热修正是可行的； k 可以通过实测曲线后段的散热部分之切线、割线斜率来估计。但由上述图像可知，这种办法估计出的散热系数 k 将略微偏小。实际上，据牛顿冷却定律，后期的温度应当是指数下降的，从而修正曲线将渐趋平缓，直至为零。

可以手动取点以实现散热修正；对每个样品的第 3 组原始数据，在散热曲线上取点，计算相关性系数 r 和 k ，可得：



表 5: 手动散热修正数据表

胶布板

t/s	22.5666	23.0778	23.8947	25.1016	25.6550	26.4298	r	$k/K \cdot s^{-1}$
T/K	1.1201	1.1196	1.1182	1.1168	1.1154	1.1139	0.993278	0.001585

瓷砖

t/s	20.5012	21.9686	23.6138	25.0367	26.5486	28.1938	r	$k/K \cdot s^{-1}$
T/K	0.6366	0.6351	0.6335	0.6324	0.6305	0.6285	0.997368	0.001034

可见, 线性良好; 但由于取点位置的不同, 给出的 k 值与自动散热修正的不尽相同, 但两者数量级一致。

2.2 误差分析

λ 测定值的精确程度强烈依赖于 $t_{1/2}$ 的精度。由上述实验数据可见, $t_{1/2}$ 值容易受到两大因素的影响, 分别是**散热问题**和**热噪声**。

根据前面的讨论可知, 散热问题可以通过修正的办法极大地改善, 从而使得 T_M 测定值更加精确, 进而导致 $T_{1/2}, t_{1/2}$ 的读出值更加准确。热噪声的影响可以通过多次测量取均值的方法尽可能地消除。

3 思考

3.1 实验装置和测定过程应当满足的条件

由上述分析可见, 此实验的理论模型在一维导热、边界绝热、一侧输入单次脉冲式热流的前提下成立。

实验过程中, 取薄圆片状样品, 令瞬时闪光均匀照射其表面, 且控制光线垂直与表面, 从而使得样品一侧极薄层内均匀吸热。样品很薄, 从而有效控制了侧面的散热, 保证了一维热流条件; 控制温升也有效地减小了散热的影响。

此外, T_0, T_M 均对应平衡态, 因此应当待装置充分冷却时开始测量; 测量过程中尽量不要干扰装置, 以免影响传热或数据采集。



3.2 对测温传感器的要求

测温传感器应当充分地小, 这可使绝热边界条件不被破坏; 同时, 较小尺寸的传感器具有较小的热容, 猜想这可使其较快达到与待测环境一致的温度, 从而导致测温响应及时。

3.3 初始温度和时间的测定

通过合理设计实验电路, 可使闪光时刻与采样时间零点重合, 从而 $t = 0$ 便是时间起点, 相应的温度便是所需数据 T_0 。

3.4 相应物理量的意义

$t_{1/2}$ 是实验中最为关键的测定值之一, 它可以看作该样品中热传导的特征时间; 相应地, λ 表征了传热的速率, 自然便有 $\lambda \propto \frac{1}{t_{1/2}}$ 。

同时, c 是样品的比热容, 它给出了温度变化和吸热量的关系, 但与传热速率无关; 由于实验中测温比测热量来得方便的多, 因此通过测定温度变化, 再乘以比例系数 c 得到热量。自然有 $\lambda \propto c$ 。

3.5 脉冲光对记录装置的干扰

实验中可见, 脉冲光照射后一瞬间, 温变曲线上可见一微小但明显的尖峰。首先, 传感器被样品、样品盒包裹, 并没有直接受到闪光照射, 且传热时间远大于尖峰的时间尺度, 因此这一现象不可能源于热传导。

由于闪光由瞬间大电流产生, 猜想这一尖峰源于电磁干扰; 可以通过恰当的屏蔽手段控制其对采集数据的影响。