

B2 准稳态法测量不良导体的热导率*

黄子维[†]

(1 中山大学中山医学院, 广东广州 510275)

摘要: 热传导是三种导热形式之一, 热导体导热遵循热传导方程。导热系数和比热是描述热导体导热性能的两个重要参量。本实验中, 我们基于热电偶测温, 采用准稳态法测量有机玻璃材料和橡胶材料的导热系数与比热, 以探究不良导体的导热规律。实验测得有机玻璃材料比热为 $1423.5 \pm 2.7 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$, 导热系数为 $\lambda = 0.17166 \pm 0.00033 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; 橡胶材料比热为 $1349.2 \pm 4.1 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$, 导热系数为 $\lambda = 0.38147 \pm 0.00100 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

关键词: 准稳态法, 不良导体, 热电偶, 比热, 导热系数

1 引言

热传导是三种导热形式之一, 热导体导热遵循热传导方程。导热系数和比热是描述热导体导热性能的两个重要参量。导热系数定义为单位温度梯度下每单位时间内由单位面积传递的热量, 单位为 $W/(m \cdot K)$ 。比热定义为单位质量某种物质在温度升高 (或降低) $1^\circ C$ 时所吸收 (或放出) 的热量, 单位为 $J/(kg \cdot K)$ 。热的不良导体导热系数低, 导热慢, 可以起到保温作用, 在许多领域具有广泛应用。

为测量不良导体的比热和导热系数, 实验采用准稳态法进行测量, 该方法只需满足导体两端温差恒定以及导体升温速率恒定即可。相比稳态法而言, 该方法具有条件容易实现, 易测量, 误差小, 可重复性和一致性好的优点。

实验采用铜-铜镍热电偶测量温度。热电偶能将温度转换为测温电路电压, 从而能即时方便读出温度值, 具有测量简便, 精度高的优点。

本实验中, 我们基于热电偶测温, 采用准稳态法测量有机玻璃材料和橡胶材料的导热系数与比热, 以探究不良导体的导热规律。

2 准稳态法实验原理 [1]

准稳态法原理的依据是热传导方程。实验测量材料为方形板状, 可抽象为无限大平板导热模型。

考虑厚度为 $2R$, 初始温度为 t_0 的一维无限大不良导体平板, 如图1。

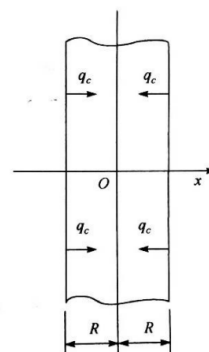


图 1: 电容电桥

在平板两侧同时施加均匀的指向中心面的热流密度 q_c , 则平板上各处的温度将随加热时间 τ 变化, 故 x 处的温度可表示为 $t(x, \tau)$ 。以样品中心为坐标原点, 则上述模型的热传导方程可写为:

$$\begin{cases} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} - \frac{a \partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} = \frac{q_c}{\lambda}; \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0 \\ t(x, 0) = t_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $a = \frac{\lambda}{\rho c}$, $q_c = c \rho R \frac{\partial t}{\partial \tau}$ 。 λ 为材料的导热系数; ρ 为材料密度; c 为材料的比热。

当加热时间 τ 满足 $\frac{a \tau}{R^2} > 0.5$ 时, τ 的求和项可

*由中山大学物理学院陆佑堂提供器材和指导。

[†]通信作者, huangzw29@mail2.sysu.edu.cn

忽略，方程的解为：

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left(\frac{a}{R} \tau + \frac{1}{2R} x^2 - \frac{R}{6} \right) \quad (2)$$

故被测样品中心和表面处的温度分别为：

$$\begin{cases} t(0, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left(\frac{a}{R} \tau - \frac{R}{6} \right) \\ t(R, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left(\frac{a}{R} \tau + \frac{R}{3} \right) \end{cases} \quad (3)$$

升温速率 v 和加热面与中心面间温度差 Δt 为：

$$v = \frac{aq_c}{\lambda R} \quad (4)$$

$$\Delta t = \frac{q_c R}{2\lambda} \quad (5)$$

可见，该状态下被测样品各处匀速升温，而 Δt 与加热时间 τ 无关，保持恒定，这种状态称为准稳态。在准稳态条件下，可以求出样品比热 c 和导热系数 λ 。

$$c = \frac{q_c}{\rho R \frac{dt}{d\tau}} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{q_c R}{2\Delta t} \quad (7)$$

因此只要在准稳态下测量样品表面和中心处的温度差及样品的升温速率，即可计算样品比热 c 和导热系数 λ 。

3 实验仪器和样品

A. 比热/导热系数实验仪 (ZKY-BRDR)

比热/导热系数实验仪具备为加热器提供电源、测量加热时间以及测量热电偶热电动势的功能，可以方便测量导体比热/导热系数。实验仪面板如图2所示。

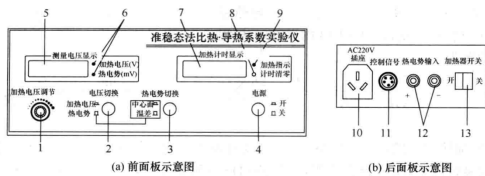


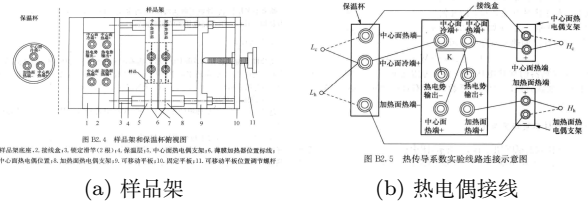
图 B2.2 导热系数实验仪示意图
1. 加热电压调节钮；2. 电压切换按钮；3. 热电势切换按钮；4. 电源开关；5. 电压测量值显示；6. 电压测量状态指示灯；7. 加热计时时间显示；8. 计时清零按钮；9. 加热指示灯；10. 电源插座；11. 控制信号接线端子；12. 热电势输入端子；13. 加热器开关

图 2: 比热/导热系数实验仪

需要注意的是实验仪只有一个电压输入端口，因此需使用测控电路切换待测电压。

B. 带保温杯的样品架

样品架与保温杯如图3a所示。热电偶接线如图3b所示



(a) 样品架

(b) 热电偶接线

图 3: 样品架和接线

1. 保温杯：可以提供恒温冷端。实验中将两热电偶冷端接触后放入保温杯中，以保证两热电偶冷端温度相同。
2. 调节螺钉：旋动螺钉，可以夹紧或松开样品架，以取放样本。
3. 铜-铜镍热电偶：将温度信号转换为热电势信号，测量温度。
4. 接线盒：放大热电势信号，以减少信号干扰；内置继电器，可以切换输出中心面热电势 U_C 和温差热电势 ΔU 。

C. 待测样品与装置

本实验测量样品为有机玻璃（密度 $\rho = 1196 \text{ kg/m}^3$ ）与橡胶（密度 $\rho = 1374 \text{ kg/m}^3$ ）。

为尽可能贴近无限大导热模型，样品形状为正方形薄板。然而，样品并非理想无限大导热模型，因此在计算面积时应引入边缘修正。修正后加热面积 F 为

$$F = \frac{S}{A} \quad (8)$$

S 为实际面积， A 为修正系数，取为 $A = 0.85$ 。

样品在样品架中的装置如图4。四块样品两两夹

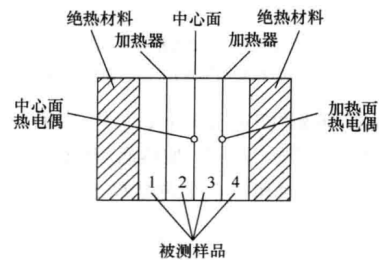


图 4: 样品在样品架中的装置

持薄膜加热器，保证样品均匀加热且两侧热阻相同，则热流密度 q_c 为加热功率的一半。

$$q_c = \frac{U^2}{2Fr} \quad (9)$$

U 为加热电压， r 为加热器电阻。

两测温热电偶分别在中心面和其中一个加热面。

4 实验步骤

1. 测量样品尺寸
2. 安装样品：松开调节螺钉，放入充分冷却后的样品，注意 #2 和 #3 样品厚度应相近。旋进螺钉，压紧样品和热电偶。
3. 打开主机电源，设定加热电压。本实验加热电压设置为 17.0V。
4. 打开加热开关，开始加热。
5. 测量热电动势：每隔 30s，记录一次中心面热电动势 U_C 和温差热电动势 ΔU 。
6. 由标定关系计算导热系数 λ 和热容 c 。
7. 更换另一材质样品，按上述步骤测量。

5 实验结果

5.1 材料尺寸

有机玻璃尺寸如表1，橡胶材料尺寸如表2。

样品	宽度 /m	厚度 /m
A	0.08967±0.00007	0.01005±0.00003
B	0.08964±0.00002	0.01011±0.00002
C	0.08964±0.00001	0.01002±0.00002
D	0.08962±0.00003	0.01003±0.00003

表 1: 有机玻璃样品尺寸

样品	宽度 /m	厚度 /m
A	0.08943±0.00022	0.01004±0.00002
B	0.08938±0.00007	0.01006±0.00002
C	0.08970±0.00005	0.01023±0.00002
D	0.08927±0.00021	0.01007±0.00001

表 2: 橡胶样品尺寸

比较有机玻璃样品尺寸：C 号和 D 号样品厚度最为接近，因此置于中心面两侧。计算样品平均厚度和面积：

$$R = 0.01003 \pm 0.00002m \quad (10)$$

$$S = 0.00803 \pm 0.00000m^2 \quad (11)$$

比较橡胶样品尺寸：B 号和 D 号样品厚度最为接近，因此置于中心面两侧。计算样品平均厚度和面积：

$$R = 0.01006 \pm 0.00001m \quad (12)$$

$$S = 0.00798 \pm 0.00002m^2 \quad (13)$$

5.2 测量有机玻璃材料导热系数 λ 和热容 c

有机玻璃升温曲线如图5

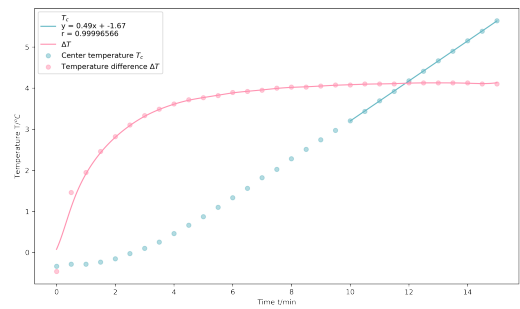


Fig. 1 The center temperature and temperature difference of the organic glasses.

图 5: 有机玻璃升温中心面温度和温差曲线

我们发现，在加热 10min 后，中心面和加热面温差恒等 ($\Delta t = 4.10^\circ C$)，中心面温度线性上升 (速率 $\frac{dt}{dt} = 0.49^\circ C/min$)。系统达到准稳态。

由式6，式7，式8和式9，代入实验参数，计算导热系数 λ 和热容 c 得：

$$\lambda = 0.17166 \pm 0.00033W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \quad (14)$$

$$c = 1423.5 \pm 2.7J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \quad (15)$$

5.3 测量橡胶材料导热系数 λ 和热容 c

橡胶材料升温曲线如图6

我们发现，在加热 5min 后，中心面和加热面温差恒等 ($\Delta t = 1.85^\circ C$)，中心面温度线性上升 (速率 $\frac{dt}{dt} = 0.45^\circ C/min$)。系统达到准稳态。

由式6，式7，式8和式9，代入实验参数，计算导

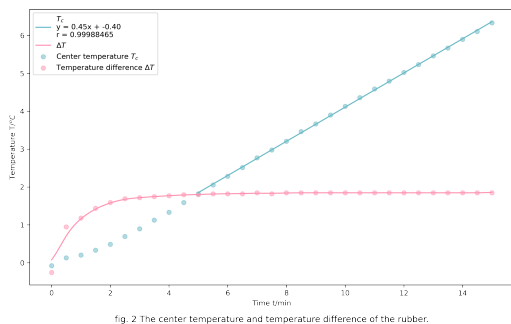


图 6: 橡胶升温中心面温度和温差曲线

热系数 λ 和热容 c 得:

$$\lambda = 0.38147 \pm 0.00100 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \quad (16)$$

$$c = 1349.2 \pm 4.1 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \quad (17)$$

6 讨论

在本实验中, 我们利用准稳态法测量了有机玻璃和橡胶材料的热导系数 λ 和热容 c 。对比我们的实验结果和参考值 (有机玻璃零摄氏度下导热系数约 $0.2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, 热容约 $1500 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; 橡胶材料由于实验用橡胶具体种类不明, 无法查阅参考值) 发现, 有机玻璃测量结果与参考值较为接近, 但仍有一定偏差。

分析实验流程, 我们认为可能的主要实验误差有:

1. 实验样品材料并非理想无限大导热模型, 虽然对面积引入了边缘修正因子 A , 但 A 大小的确定是经验性的, 这可能会引入较大误差。
2. 实验用样品材料尺寸并非绝对一致均匀相同, 中心面两侧样品厚度并非完全相等, 这可能会对导热带来影响。
3. 实限于实验条件, 冷端并非置于摄氏零度环境, 但我们参考的热电偶分度表是基于冷端摄氏零度标定的, 因此热电偶温度-电压系数可能并不准确。
4. 橡胶材料具有弹性, 使用游标卡尺测量难以控制, 这会引入测量误差。
5. 由于实验须在升温过程中手动记录数据并切换电压测量, 难以把握记录时机, 可能时间记录并不完全准确。

7 结论

在本实验中, 我们利用准稳态法测量了有机玻璃和橡胶材料的热导系数 λ 和热容 c , 发现两者的导热系数都较低, 有机玻璃导热系数比橡胶小; 而有机玻璃热容比橡胶大。

我们发现使用准稳态法可以方便的测量不良导体的导热系数和热容, 但仍存在一定的实验误差, 有进一步的改进的空间。

参考文献

- [1] 沈韩. 基础物理实验[M]. [出版地不详]: 科学出版社, 2015 (引用页: 1).

Measurement of thermal conductivity of bad conductors by quasi-steady state method *

Ziwei, Huang¹ [†]

¹ Zhongshan School of Medicine, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Heat conduction is one of the three forms of thermal transmission, and the heat conduction of thermal conductors follows the heat conduction equation. Thermal conductivity and specific heat are two important parameters in describing the heat-conducting capabilities of heat conductors. In this experiment, we measured the thermal conductivity and specific heat of Plexiglas and rubber materials based on thermocouple temperature measurement and quasi-steady-state method, aiming to investigate the thermal conductivity law of poor conductors. The specific heat of the plexiglass material is $1423.5 \pm 2.7 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ and the thermal conductivity is $\lambda = 0.17166 \pm 0.00033 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; the specific heat of the rubber is $1349.2 \pm 4.1 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ and the thermal conductivity is $\lambda = 0.38147 \pm 0.00100 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Key words: Quasi-steady-state method, poor conductor, thermocouple, specific heat, thermal conductivity

*Supported and taught by Luyoutang, School of Physics, Sun Yat-sen University

[†]Corresponding author. huangzw29@mail2.sysu.edu.cn

B2 准稳态法测量不良导体的热导率补充材料

实验人：黄子维 20980066

合作者：黄睿杰 20980062

实验时间：2021.11.25 星期四 上午 室温：22°C 相对湿度：40%

实验设备

编号	名称	数量	仪器参数及型号
1	比热/导热系数实验仪	1	$ZKY - BRDR$
2	样品架和保温杯	1	$ZKY - BRDR/S$
3	有机玻璃样品	4	
4	橡胶材料样品	4	
5	T 型热电偶	2	

表 S1: 实验设备

实验参数

项目	参数
加热电压 U	17.0V
电阻 r	110 Ω
有机玻璃密度 ρ	1196kg/m ³
橡胶材料密度 ρ	1374kg/m ³

表 S2: 实验参数

思考题

1. 样品导热系数的大小与温度有什么关系？

样品的导热系数随温度升高而变大。这是因为温度升高会加快分子热运动，促进固体骨架的导热及孔隙内流体（如气体）的对流传热。此外，孔壁间辐射换热也会随温度的升高而加强。

2. 样品导热系数的大小与导热性能有什么关系？

导热系数越大，导热性能越好。在热流密度和厚度相同时，物体高温侧壁面与低温侧壁面间的温度差随导热系数增大而减小。

3. 分析本实验的主要误差来源？

1. 实验样品材料并非理想无限大导热模型，虽然对面积引入了边缘修正因子 A ，但 A 大小的确定是经验性的，这可能会引入较大误差。
2. 实验用样品材料尺寸并非绝对一致均匀相同，中心面两侧样品厚度并非完全相等，这可能对导热带来影响。
3. 实限于实验条件，冷端并非置于摄氏零度环境，但我们参考的热电偶分度表是基于冷端摄氏零度标定的，因此热电偶温度-电压系数可能并不准确。
4. 橡胶材料具有弹性，使用游标卡尺测量难以控制，这会引入测量误差。
5. 由于实验须在升温过程中手动记录数据并切换电压测量，难以把握记录时机，可能时间记录并不完全准确。

4. 本实验中怎样实现稳定导热？如何判定已经到达稳定导热状态？

稳定导热：

1. 实验采用薄膜加热器，其加热功率在加热面上均匀且可精确控制。提供稳定电压，则加热功率可以维持恒定。
2. 使用四块完全相同的待测样品两两夹持薄膜加热器，对称平衡热传导，保证导热稳定。

判定：

1. 中心面温度随时间线性上升
2. 中心面和导热面温差恒定

项目源码

[SYSU-PHY-EXP/B6 Thermal conductivity.Jeg-Vet\(github.com\)](https://github.com/Jeg-Vet/SYSU-PHY-EXP-B6-Thermal-conductivity)

[实验内容]

[实验数据] 加热电压 17.0V 加热电阻 110Ω

1. 确定同一铜镍热电偶的电压温度系数

① 取下中心热电偶及加热热电偶

用欧姆表分别测量冷端和热端电阻

② 将热电偶和标准温度计一同放入恒温水槽

③ 保温杯中加入冰水混合物

④ 按 B25 连接线路 接通电源

电压切换 → 热电势

热电势切换开关 → 中心热电势

⑤ 使恒温水槽从室温加热至 100°C

记录热电偶热电势与温度对应关系

⑥ 计算 U-T 系数 (约 0.04mV/°C)

A. 尺寸

有机玻璃

橡胶板

	宽度	厚度	宽度	厚度
A	1/2	87.61	10.01	87.62
		87.60	10.05	87.61
		87.73	10.06	87.23
	3/4	87.73	10.09	87.25
B	1/2	87.62	10.08	87.32
		87.66	10.13	87.33
		87.63	10.11	87.43
	3/4	87.64	10.11	87.45
C	1/2	87.63	10.01	87.70
		87.65	10.06	87.65
		87.63	10.01	87.77
	3/4	87.64	10.02	87.66
D	1/2	87.65	10.03	87.70
		87.64	10.00	87.08
		87.60	10.07	87.44
	3/4	87.60	10.43	87.45

B. 有机玻璃

T _c	ΔT	T _c	ΔT	T _c	ΔT
0min	-0.013	-0.018	5.5min	0.043	0.149
0.5min	-0.011	0.057	6.0min	0.052	0.152
1	-0.011	0.076	7	0.061	0.153
	-0.009	0.096		0.071	0.154
	-0.006	0.110		0.079	0.156
	-0.001	0.121		0.089	0.157
	0.004	0.130		0.098	0.157
	0.010	0.136		0.107	0.158
	0.018	0.141		0.116	0.159
	0.026	0.145	10.0min	0.125	0.159
5min	0.034	0.147			

2. 测量有机玻璃样品入和 C

① 测量四个样品尺寸

② 金属样品并厚度

1. 松开出轴, 按出支板

2. 放入冷却后样品, 注: 2.3 度厚最准确

3. 压紧样品

③ 打开主电源, 预热 10min

电压切换 → 加热电压

加热电压调至 18V

④ 测定 ΔT 和中心热电势

1. 电压切换 → 热电势

热电势切换 → 温差 等待直到示数 < 0.04mV

2. 打开加热开关 每隔 30s 记录一次温差热电势

和中心热电势

升温时间应在 15min 左右

⑤ 由标准关系计算 ΔT 和 T, 作出随时间变化曲线

计算入和 C, 注: 数据应满足 $\frac{\Delta T}{T} > 0.5$, T 线性上升

3. 换橡胶样品: ① 关闭加热 ② 关闭电源 ③ 取样品

④ 取热电 ⑤ 冷却薄膜 ⑥ 压紧样品

C. 橡胶板

T _c	ΔT	9min	T _c	ΔT
0min	-0.003	-0.010	8.5min	0.149
0.5min	0.005	0.037	9.5min	0.152
1	0.008	0.046	10	0.161
	0.013	0.056		0.170
	0.019	0.062		0.179
	0.027	0.066		0.187
	0.035	0.067		0.196
	0.044	0.068		0.204
	0.052	0.069		0.213
	0.062	0.070		0.221
	0.071	0.070		0.230
	0.080	0.071		0.238
	0.089	0.071		0.247
	0.098	0.071		
	0.108	0.072		
	0.116	0.071		
8min	0.125	0.072		
8.5min	0.135	0.072		