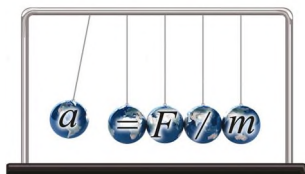


文章编号:1005-4642(2020)05-0011-04



普通物理实验

稳态法测量导热系数实验的温度补偿

车宇, 丁望峰

(杭州师范大学物理系, 浙江 杭州 311121)

摘要:在稳态法测量不良导体导热系数的实验中,样品上、下表面的温度值分别通过测量发热盘和散热盘的温度来获得。在实际操作中,通常是测量发热盘(散热盘)中心的温度;而由于发热盘(散热盘)本身具有一定厚度,因此其中心的温度并不能代表它与样品接触面的温度,针对该问题提出了温度补偿的方法,可以减小测量样品上、下表面温差时产生的实验误差。

关键词:稳态法;导热系数;温度补偿

中图分类号:O551.3

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.05.003

“稳态法测量不良导体的导热系数”是大学物理实验课中广泛开设的实验内容^[1]。为得到精确的测量结果,减小多方面引起的误差,实验对环境和测量者有着较高的要求。以往的误差研究主要集中在:样品侧面的散热,是否达到热平衡,散热方式及环境中空气对流的影响,冷却曲线的分析处理等^[2]。为了减小以上因素带来的误差,已有文献提出了相应的方法^[3-7]。

但样品上下表面的温度测量所引起的误差常被忽视。如图1所示,通常把加热盘A和散热盘P的温度作为样品上下表面的温度。因为加热盘和散热盘都由金属良导体制作,可认为各部分温度相等。而在实际实验中发现,加热盘A是通过上表面的电热丝加热的,而样品B与其下表面紧贴;温度传感器插入位置处于加热盘(散热盘)上下表面中间,测量中心的温度值。由于加热盘(散热盘)本身具有一定厚度,在上下表面之间形成温

度梯度,因此这时温度传感器测量的金属盘中心温度并不能作为样品与其接触面的准确温度值。同样,样品另一侧的散热盘P中心温度测量值也不能视为样品下表面的准确温度。

为此,笔者在不改变实验现有装置的前提下,提出一种温度补偿方法,可以尽可能减少测量样品表面温度所带来的误差。

1 实验装置

实验装置采用杭州精科仪器有限公司生产的TC-3C型稳态法固体导热系数测定仪,包含控制箱和测试架。测试架结构如图2所示,加热盘为铝制圆盘,温度传感器1的探头插入到其中心位

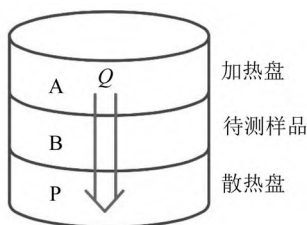


图1 实验原理图

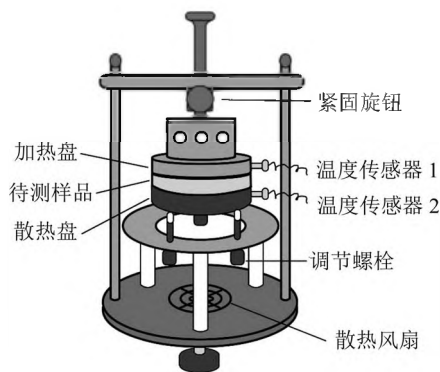


图2 TC-3C型实验测试架

收稿日期:2019-12-11

作者简介:车宇(1983-),女,吉林白城人,杭州师范大学物理系实验师,硕士,主要从事大学物理实验教学和管理工作的。

通信作者:丁望峰(1984-),男,浙江义乌人,杭州师范大学物理系实验师,博士,主要从事物理实验设计与开发工作。E-mail:dingwff@hznu.edu.cn



置,上面的加热装置可对其上表面进行精准的 PID 温控加热;散热盘为同等大小的铜制圆盘,温度传感器 2 的探头插入到其中心位置. 仪器的控制箱集数据采集与实验条件控制于一体,如图 3 所示. 左侧为双路温度数据采集区,可以按指定时间间隔进行数据的采集记录,并具有作图和导出功能. 右侧为加热装置的 PID 智能温度控制区,可设定加热盘的恒温温度.

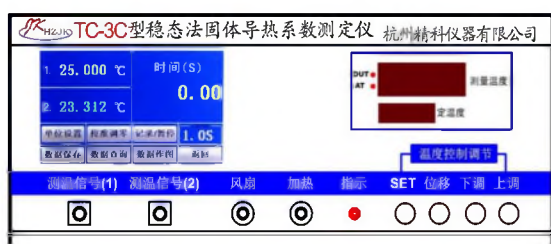


图 3 TC-3C 型实验控制箱

2 实验原理

设发热盘、待测样品和散热盘三者温度分布达到平衡,此时样品上下平面温度分别为 T_1 和 T_2 ,根据傅里叶热传导方程,在 Δt 时间内通过样品的热量 ΔQ 满足:

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

式中, λ 为样品的导热系数, h_b 为样品的厚度, S 为样品平面的面积. 实验样品为圆盘状,设圆盘直径为 d_b ,则式(1)为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{4h_b} \pi d_b^2. \quad (2)$$

实验中,加热盘 A 保持温度不变,当散热盘温度稳定时,可认为加热盘 A 通过样品传递的热量与散热盘 P 向周围环境散热量相等. 因此,可以通过散热盘 P 在稳定温度 T_2 时的散热速率求出热量 $\Delta Q/\Delta t$.

为测量散热盘 P 在稳定温度 T_2 时的散热速率,实验时,当测得稳态时的样品上下表面温度 T_1 和 T_2 后,将样品 B 抽去,让加热盘 A 与散热盘 P 接触,当散热盘的温度上升到高于稳态时的 T_2 值 $5 \sim 10$ °C 时,移开加热盘,让散热盘冷却,记录散热盘温度 T 随时间 t 的下降情况,求出散热盘在 T_2 时的冷却速率 $\left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2}$,则散热盘 P 在

T_2 时的散热速率 $\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{T=T_2}$ 为

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{T=T_2} = mc \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2}, \quad (3)$$

式中, m 为散热盘 P 的质量, c 为其比热容.

在达到稳态的过程中,散热盘 P 的上表面并未暴露在空气中,而物体的冷却速率与它的散热表面积成正比,因此,稳态时散热盘 P 的散热速率的表达式应作面积修正:

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{T=T_2} = mc \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \frac{\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p}{2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p}, \quad (4)$$

其中 R_p 为散热盘 P 的半径, h_p 为其厚度. 由式(2)和式(4)可得

$$\lambda \frac{T_1 - T_2}{4h_b} \pi d_b^2 = mc \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \frac{\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p}{2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p}, \quad (5)$$

所以样品的导热系数 λ 为

$$\lambda = mc \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \frac{R_p + 2h_p}{2R_p + 2h_p} \cdot \frac{4h_b}{T_1 - T_2} \cdot \frac{1}{\pi d_b^2}. \quad (6)$$

3 实验方法

实验使用与加热盘 A、散热盘 P 平面面积等大的硅胶圆片作为待测样品,在确保三者对齐后拧紧紧固旋钮,使加热盘、样品、散热盘紧密接触.

使用游标卡尺多次测量,得到加热盘、硅胶样品和散热盘的平均厚度分别为 10.78 mm, 7.80 mm 和 11.56 mm.

将 2 个温度传感器分别插入加热盘 A 与散热盘 P 侧面的小孔中,在探头上涂少量硅脂以便保证良好的导热性. 在仪表右侧的 PID 温度控制区设置加温的上限温度为 90 °C, 30~60 min (视样品 B 厚薄而定) 后,当加热盘 A 与散热盘 P 的温度不再上升,说明系统达到稳态. 每隔 3 min 记录 T_1 和 T_2 值,多次测量取平均. 如果记录的温度值有明显上升趋势,则应舍弃并等待系统稳定. 表 1 中的 T_1 和 T_2 值为系统温度平衡后的多次测量结果.

然而,表 1 中测量的 T_1 和 T_2 值并不能作为稳态时待测样品上下表面的温度,因为加热盘 A 和散热盘 P 都有一定厚度,而传感器测量的是其中心位置温度,不能代表 A 盘下表面和 P 盘上表面的温度. 因此,使用了 TM-902C 电子温度计进行验证,如图 4 所示. 该温度计探头为 K 型温差电偶电阻,体积非常小(见图 4 插图),可以将它夹在加热盘(散热盘)和硅胶片中心之间,由于硅胶

片具有一定弹性,在压力下它与加热盘(散热盘)仍能紧贴,所以不会对实验造成影响.在保证实验条件和环境条件(如室温、空气流动等)相同的情况下,通过该温度计对加热盘(散热盘)和样品的接触面中心进行了测量,得到了更接近于样品上(下)表面实际温度的值 T_1 (T_2).从表 1 中可以看出,实验自带传感器测量的平均温差 $\Delta T = T_1 - T_2 = 24.85\text{ }^\circ\text{C}$,而用外接温度计测量的平均温差 $\Delta T^0 = T_1^0 - T_2^0 = 20.39\text{ }^\circ\text{C}$,两者相差 $4.46\text{ }^\circ\text{C}$,可见本实验中由测量样品上、下表面温差产生了近 22% 的误差.

表 1 实验自带温度传感器和外接温度计测得的结果

t/min	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_1^0/^\circ\text{C}$	$T_2^0/^\circ\text{C}$
0	90.12	65.25	88.28	67.86
3	89.85	64.80	87.56	66.95
6	89.78	64.58	88.12	66.88
9	90.25	65.78	87.48	67.54
12	90.18	65.48	87.36	67.24
15	89.95	65.10	87.45	67.45
平均值	90.02	65.17	87.71	67.32

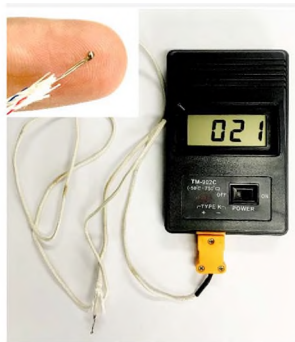
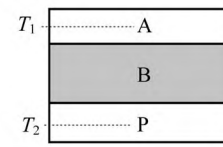


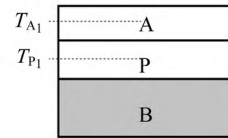
图 4 TM-902C 型温度计

为了在现有实验室条件下,不增加其他设备就能达到更精确测量样品上下表面温度的目的,提出了以下温度补偿测量方法,即在按上述常规实验步骤测量 T_1 和 T_2 后:

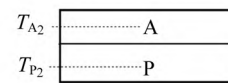
1) 移开加热盘 A,将待测样品 B 与散热盘 P 位置互换,即从上到下为加热盘 A、散热盘 P 和待测样品 B[图 5(b)],再拧紧调节螺栓使三者紧贴.保持上一步 PID 设置的加热盘温度(这里为 $90\text{ }^\circ\text{C}$)不变,达到稳态后记下加热盘实测温度 T_{A1} 与散热盘实测温度 T_{P1} ,计算两者的温差 $\Delta T_1 = T_{A1} - T_{P1}$.



(a) 正常测量模式



(b) 补偿测量步骤 1)



(c) 补偿测量步骤 2)

图 5 正常测量模式下和温度补偿测量步骤中加热盘 A、样品 B 和散热盘 P 的不同放置顺序

2) 移开加热盘 A,取下待测样品 B,保持加热盘与散热盘紧贴状态[图 5(c)].设置 PID 的加热温度比稳态值 T_2 高 $3\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,待稳定后记下加热盘实测温度 T_{A2} 与散热盘实测温度 T_{P2} ,计算两者的温差 $\Delta T_2 = T_{A2} - T_{P2}$.

3) 最后,取 ΔT_1 和 ΔT_2 的平均值作为温差补偿,即样品在稳态时上下表面的温度差修正为

$$\Delta T_{\text{修}} = (T_1 - T_2) - \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2}. \quad (7)$$

把上述测量的数据记录在表 2 中,结合表 1 的测量数据,发现根据式(7)修正后的样品上、下表面温差值为 $20.81\text{ }^\circ\text{C}$,与外接温度计的测量值 $20.39\text{ }^\circ\text{C}$ 相比,两者非常接近.

表 2 温度补偿测量步骤的测量结果

t/min	$T_{A1}/^\circ\text{C}$	$T_{P1}/^\circ\text{C}$	$T_{A2}/^\circ\text{C}$	$T_{P2}/^\circ\text{C}$
0	89.80	85.68	68.75	65.28
3	90.04	85.45	68.54	65.45
6	89.95	84.86	68.88	65.12
9	90.25	85.88	69.24	65.36
12	90.08	85.24	68.96	64.85
15	89.75	85.65	68.75	65.68
平均值	89.98	85.46	68.85	65.29

4 分析与讨论

如图 5 所示,温度补偿测量步骤 1) 中,样品 B

与散热盘 P 互换对于加热盘 A 而言, 传热过程并没有受到明显影响, 即 $T_{A1} \approx T_1$, 因此这时 A 下表面温度仍可代表正常测量模式下样品上表面的温度. 同时, 由于 A 与 P 都是良导体, 可认为两者中心连线上的温度梯度是均匀的, 所以正常测量模式下样品 B 上表面(即 A 下表面)的温度修正为

$$T_{1修} = T_1 - \frac{T_{A1} - T_{P1}}{2}. \quad (8)$$

在补偿测量步骤 2) 中, 加热盘 A 设定在比稳态值 T_2 高约 $3\text{ }^\circ\text{C}$, 以使稳定后的散热盘 P 温度接近 T_2 , 这样此时 P 就非常接近于正常测量模式下的状态, 由此 P 上表面的温度可近似代表正常测量模式下样品下表面的温度. 同样, 由于 A 与 P 都是良导体, 可认为两者中心连线上的温度梯度是均匀的, 故正常测量模式下样品 B 下表面(即 P 上表面)的温度修正为

$$T_{2修} = T_2 + \frac{T_{A2} - T_{P2}}{2}. \quad (9)$$

综上所述, 根据式(8)和式(9), 可以对样品上下表面的温差进行形式如式(7)的修正.

5 结 论

在稳态法测导热系数实验中, 样品上下表面的温度多以测量加热盘与散热盘的中心温度来获

取, 在实验中发现该数值与样品上下表面的实际温度值间有约 20% 的误差. 在不改变或新增实验设备的情况下, 提出了测量样品上下表面温差的修正方案, 即通过 2 个额外的温差补偿测量步骤, 实现了对样品上下表面温差更精确的测量.

参考文献:

- [1] 金清理, 黄晓虹. 基础物理实验[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 143-149.
- [2] 陈康, 胡庆平. 测不良导体导热系数中误差的研究[J]. 硅谷, 2008(12): 2.
- [3] 孙平, 汪梅芳. 对不良导体导热系数测量原理的修正[J]. 物理与工程, 2001, 11(3): 31-33.
- [4] 张广斌, 鲍军委, 董大兴. 稳态法导热系数测量的误差分析及改进方案[J]. 大学物理实验, 2013, 26(5): 94-96.
- [5] 李泽朋, 郭松青, 王维波. 稳态法测量不良导体导热系数的改进设计[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(6): 77-79.
- [6] 程德胜, 张辉, 马书炳, 等. 稳态法测量导热系数面积修正误差分析[J]. 物理实验, 2019, 39(12): 15-18.
- [7] 王槿, 吴迪, 惠王伟, 等. 采用 EDA 技术改造 TC-II 型闪光法热导仪[J]. 物理实验, 2019, 39(9): 33-36.

Temperature compensation in the experiment of measuring thermal conductivity by steady state method

CHE Yu, DING Wang-feng

(Department of Physics, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract: In the experiment of measuring thermal conductivity of poor conductors by steady state method, temperatures of the two sides of the flat sample need to be measured. However, in practice, the temperatures of the heater and the cooler were usually measured instead, introducing a large experimental error up to 20%. In this paper, extra measuring steps for the compensation of the sample temperature were proposed, leading to a robust improvement of the accuracy of this experiment.

Key words: steady state method; thermal conductivity; temperature compensation

[责任编辑: 尹冬梅]