



第50届国际物理奥林匹克竞赛实验试题第二题

惠王伟 宋峰

(南开大学物理科学学院 300071)

维德曼-夫兰兹定律(10分)

在金属中,热传导主要是由其内部电子传导的,所以,金属的电导率和热导率是相关的。这就是维德曼-夫兰兹定律。在本实验中,主要的目标是以合理的高精度测量几种金属的热学和电学参量。在A部分,将测量紫铜、黄铜和铝的电导率。在B部分,将测量紫铜的热导率。在C部分,将测量紫铜的比热容。在D部分,将测量黄铜和铝的热导率。最后,在E部分,主要验证所研究的金属的这些物理参量之间的普适关系。

在这个实验中,不需要进行任何误差计算。

注意在B部分和D部分中都有15分钟的等待时间,要合理的规划时间。

安全须知:请勿将任何电线或未经许可的仪器

直接连接到220V/25A外部电源插座上。只能将提供的电源未经改动地连接到外部电源插座上。

实验器材清单:

1. 紫铜空心圆管,长度为200.0 mm,内径为6.0 mm,外径为20.0 mm。
2. 黄铜空心圆管,长度为200.0 mm,内径为6.0 mm,外径为19.0 mm。
3. 铝制空心圆管,长度为200.0 mm,内径为6.0 mm,外径为20.0 mm。
4. 小永磁铁,质量为1.2克。
5. 储水罐,当地一种专门设计的锅,锅盖包括内部的热交换器和顶部的螺钉。提供了4升的纯净水(2×2升的瓶子),用于倒入储水罐。
6. 杆#1,直径为20.0 mm的紫铜棒,其上有多个温度传感器,内置加热器连接到红线(图2.a)。红



图1 实验器材

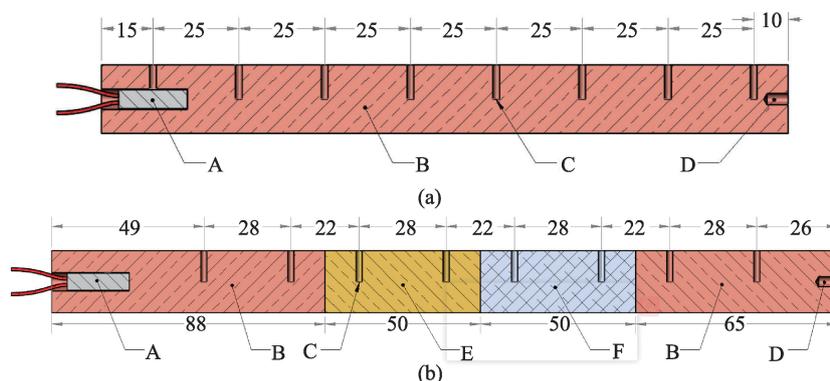


图2 (a) 杆#1紫铜棒;(b)杆#2复合棒

图中距离单位为mm,精度为0.1mm;A.连接红色导线的加热器;B.紫铜杆;C.温度传感器;

D.螺纹孔(用于连接储水罐的盖的顶部的螺丝);E.黄铜杆;F.铝杆。

线应通过电路连接到直流电源(下面的第15项装置)。杆上包有黑色的隔热海绵。

7. 杆#2,直径为20.0 mm的复合棒,其上有多个温度传感器,内置加热器连接到红线(图2.b)。红线应通过电路连接到直流电源(下面的第15项装置)。杆上包有黑色的隔热海绵。

8. 隔热盖。

9. 12V直流电源,数显表的电源。

10. 数显表。可以显示8个温度传感器的数值,可以显示时间,能用作秒表。

11. 连接数显表和温度传感器的测试线。

12. 电压表,电压表功能应设置为20V直流(图3)。

13. 电流表,电流表功能应设置为10A直流(图3)。

14. 导线。

15. 9V直流电源,为加热器供电。

警告:

1. 仅将提供的电源(带有标准AC插头)连接到外部电源插座。严禁将绝缘导线或其他设备连接到插座,这可能会造成严重伤害。

2. 请勿将杆#1和杆#2浸入水中。

数显表的使用说明:

将数显表连接到12V直流电源,为其提供电源。数显表有两种工作模式:温度显示模式和秒表模式。其与温度传感器连接在一起时,数显表将自动切换到温度显示模式。当断开与温度传感器连接时,数显表会自动切换到秒表模式。

温度显示模式:

- 按下红色按钮并保持3秒钟,将会重置时间。
- 短暂按下红色按钮将会使显示暂停,但仍然在计时。
- 再次按下红色按钮将恢复温度和时间的实时显示。

在秒表模式:

- 按下红色按钮开始计时。
- 再次按下红色按钮停止计时。
- 长按会使秒表归零。

首次使用前,数显表必须为每个杆校准读数,因为实验中使用的温度传感器并不完全相同。因此,当杆处于热平衡状态时,需要通过校准使得所有传

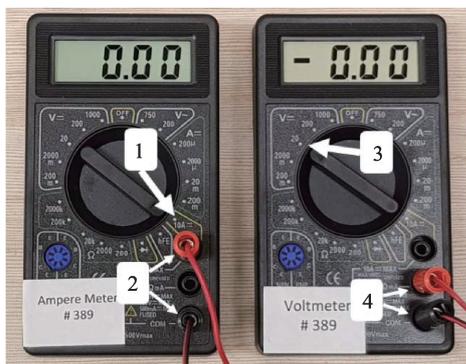


图3 电压表和电流表

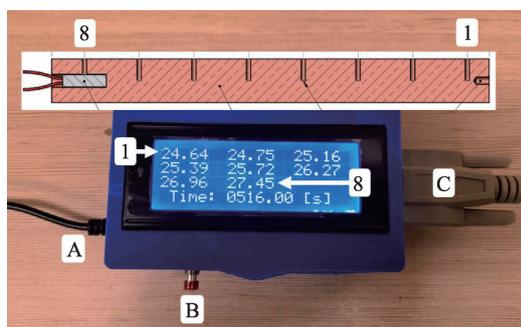


图4 数显表

传感器的读数相同。首先将测试线的一端连接到杆上,然后按住红色按钮,同时将测试线的另一端连接到数显表。断开电源或者测试线不会消除校准。

警告:将杆连接到储水罐或将其加热器连接到电源之前,必须先校准,以确保在校准过程中杆的温度均匀。如果数显表出现任何问题,先将数显表与电源断开,然后重新连接,其会记住上一次的校准结果。

A 部分:紫铜、铝、黄铜的电导率(1.5分)

理论:

当永磁铁掉入空心圆柱形导电管内时,由于感应出的涡流会产生阻力,磁铁会达到终极速度。对于此几何形状,终极速度可以表示为:

$$v_{\text{terminal}} = \frac{8\pi m g a^2}{\mu_0^2 (\pi r_m^2 M)^2 \sigma w f\left(\frac{d}{a}\right)}$$

其中, m 是磁铁的质量, σ 是管的材料的电导率, a 是管的内半径, r_m 是磁铁的半径, d 是磁铁的高度, M 是剩余磁化强度, w 是管壁的厚度, $f\left(\frac{d}{a}\right)$ 是尺度函数。在本实验中, $a \approx r_m$, $d = z r_m \approx 2a$, $f(2) \approx 1.75$ 。因此,磁铁从管中通过所花费的时间可以近似为:

$$t = 0.22 \frac{\pi r_m^2 (\mu_0 M)^2 w L_0}{m g}$$

其中, $L_0=0.2\text{ m}$ (管的长度),假设磁铁下落后立即达到终极速度。

计算所需的管和磁铁的参数为: $\mu_0 M = 0.65\text{ T}$,
 $w_{\text{Aluminum}} = w_{\text{copper}} = 7.0 \times 10^{-3}\text{ m}$,
 $w_{\text{Brass}} = 6.5 \times 10^{-3}\text{ m}$,
 $m = 1.2 \times 10^{-3}\text{ kg}$,
 $r_m = 3.0 \times 10^{-3}\text{ m}$,
 $g = 9.8 \times \text{m/s}^2$ 。

实验:

A.1(1.0分)

在秒表模式下使用数显表,测量磁铁从铝,紫铜和黄铜制成的空心管中掉落所需的时间,在表A1中写下测量值。

A.2(0.5分)

使用上面的公式,计算三种材料的电导率。

A部分主要研究紫铜、铝、黄铜的电导率。本题通过测量磁铁穿过三种空心管所需的时间,并利用题目中提供的公式就可以计算出各个材料的电导率。在测量时间时,要重复测量,满足一定的测量次数,以提高测量的准确性。

B 部分:紫铜的热导率(3.0分)

本部分的目的是测量接近稳态的紫铜的热导率。

理论:

热导率 κ 通过公式 $P(x) = -\kappa A \frac{\Delta T(x)}{\Delta x}$ 定义。该公式描述了局部温度梯度和流经材料横截面的



图5 B.1装置图

局部功率之间的线性关系。 $P(x)$ 是流经位置 x 处横截面的功率, A 是杆的横截面积, $\frac{\Delta T(x)}{\Delta x}$ 是位置 x 处的温度梯度。

实验

将数显表连接到外部插座和杆#1,并校准。将4升(2瓶)的水倒入储水罐中,充分浸入热交换器并盖上锅盖。

B.1(0.1分)

杆#1放置在桌上时,记录初始温度。

从杆上断开测试线,取下隔热盖,将杆#1拧到锅盖上,如图5所示,重新连接测试线。注意不要施加太大的力。

B.2(0.5分)

画出加热器供电并测量其功率的电路图,电路中应包含9V电源、加热器、电压表、电流表和导线。可以使用导线作为开关来断开和闭合电路。

热导率是通过在杆的一端加热,同时将杆的另一端保持与储水罐几乎相同的恒定温度下进行测量的。

我们的目标是使所有温度传感器都接近稳定状态。连接B.2部分的电路,并给加热器通电。

B.3(0.1分)

通过适当的测量,计算出加热器的功率 P ,并将其写在答题纸上。

通电,然后等待15分钟(可以利用这段时间来规划你的实验)。

B.4(0.5分)

在所提供的表中记录所有8个温度传感器在大约15分钟,17.5分钟,20分钟时的温度数据。

B.5(1.0分)

在一张坐标纸上,画出不同时间温度传感器的读数与位置的关系图,这个关系图在D部分中也会用到。

B.6(0.5分)

使用时间约为17.5分钟的数据,求出紫铜的热导率 κ_0 ,忽略这部分的任何热量损失。估算在大约

17.5分钟时杆的平均温度变化速率 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ 。

B.7(0.3分)

κ_0 与真实值相比,是更高? 更低? 还是相同?

B部分主要研究的是紫铜的热导率,本题通过测量流过样品横截面积的功率和温度梯度,利用题目中提供的公式就可以计算出紫铜的热导率。操作时,要严格按照说明进行校准。在加热器通电后,要等待15分钟,要合理的利用这段时间,准备后面的实验。

C部分:测量紫铜的热损耗和热容(4.0分)

理论:

热容 C 可以用以下任意一个公式来定义:

$$\Delta Q = C\Delta T, \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)$$

公式中的 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 是净传热速率, $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ 是温度变化率, c_p 是比热容,为单位质量的热容。紫铜杆的质量为0.58 kg。

实验:

关闭加热器的电源,将电路断开,拧松螺丝,把杆#1放在桌子上。把隔热盖装在杆上,就像你在实验开始时看到的那样。重新连接加热器电路,并重新连接杆到数显表。

警告:请勿在不监视温度的情况下长时间打开加热器。

经过冷却、加热和再次冷却一系列过程,可以得到材料的热损耗和热容。加热步骤应将平均温度改变约2.5℃。整个过程应为10~15分钟,以实现实验所需精度。

目标是在B部分接近于稳态的平均温度附近做实验。为了考虑杆上存储的所有热量,需要跟踪其平均温度,杆中心的温度是平均温度的很好近似。

C.1(1.0分)

执行一次冷却-加热-冷却程序,并将测量结果记录在表C1中,以获得平均温度。

C.2(1.0分)

在坐标纸上绘制平均温度与时间的关系曲线。

C.3(1.0分)

使用上图,计算B部分平均温度附近的比热容 c_p 和每单位时间的热损失 P_{loss} 。使用示意图和公式描述所使用的方法。

为了提高在B部分得到的导热率的准确性,应考虑两个主要机制:由于通过绝热层的径向传热而产生热量损失和测量时系统未达到稳态。

对于一级近似,可以假设由于这些机制,沿着杆的单位长度 $\frac{\Delta P(x)}{\Delta x}$ 是常数。

C.4(1.0分)

考虑到上述两种机制,写出B部分的热导率修正公式。利用实验B部分和C部分的 κ_0 , P , c_p , m , P_{loss} , $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ 表示修正后的热导率,计算其值。

C部分主要研究的是紫铜的热损耗和热容,本题通过使样品经过冷却-加热-再冷却一系列过程,可以得到紫铜的热损耗和热容。实验过程中,要控制整个过程的时间,以实现实验所需的测量精度。

D部分:黄铜和铝的热导率(1.0分)

将杆#2与数显表相连接,并按照B部分介绍的方法校准温度传感器。

D.1(0.1分)

记下放在桌子上时杆的初始温度。

如图4所示,断开测试线,并将杆#2装到储水罐的盖上。将测试线重新连接至数显表。重复B部分中的步骤,加热使其接近稳态。进行测量之前,至少要等待15分钟。

为了达到本部分所要求的精度,可以假定杆处于稳定状态。另外,可以假设沿着棒的每单位长度的热量损失是恒定的。

D.2(0.2分)

记下杆#2的所有8个传感器的温度读数,并记

下其每个部分的 $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ 。

对于一级近似,可以使用与任务C.4中相同的假设,即 $\frac{\Delta P(x)}{\Delta x}$ 是常数。

D.2(0.7分)

给出 κ_{Brass} 和 $\kappa_{Aluminum}$ 的表达式,使用之前的测量值,计算其数值。

D部分主要研究的是黄铜和铝的热导率。操作步骤与B部分相似,需要推导出 κ_{Brass} 和 $\kappa_{Aluminum}$ 的表达式。注意实验前一定要对杆#2的温度传感器进行校准。

E部分:维德曼-夫兰兹定律(0.5分)

由维德曼-夫兰兹定律可知,在热传导由电子主导的金属中,热导率和电导率的比值与绝对温度成线性关系。此外,该定律指出,斜率 $L = \frac{\kappa}{\sigma T}$,对于大多数金属是相同的,并且仅取决于自然界的普适量。实际上,对于室温下的金属,该定律的误差约为10%。

E.1(0.5分)

在表E1中写下得到的热导率和电导率(κ , σ)。计算每种材料的 L 值并将其填入同一表E1中,假设一级近似下,热导率不依赖于温度。

E部分主要研究的是维德曼-夫兰兹定律。本题利用前面所得到的不同材料热导率和电导率结果,计算 L ,以此来验证其普适性。

* * * * *

欢迎读者朋友参与“物理奥赛”系列专题的有奖竞答活动,并在答案公布前将您的解答同时发送至 aosai@ihep.ac.cn 邮箱。对于参与并答对每期题目的前20名读者,编辑部将赠阅1年《现代物理知识》杂志。