

实验 10—Part 1 使用稳态平板法（平板热流计法）测量材料导热系数和热阻

【实验目的】

- 1、了解稳态平板法（平板热流计法）测量材料导热系数的原理
- 2、学会使用导热系数测量仪测量不同材料的导热系数。

【实验仪器】

- 1、DRPL- I 热导率动态测量仪、计算机各 1 台
- 2、圆柱状石英样品、方块状橡胶样品和圆柱状铝合金样品各 1 个

【原理概述】

热传导是热传递三种基本方式之一。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 $W/(m \cdot K)$ 。导热系数也可表述为截面积为 1 平方米的柱体沿轴向在相距 1 米、温度差为 1 开尔文的两个横截面之间热传导的功率。导热系数越大，说明该材料的热传递速度越快，导热性能越好。热阻系数亦称为热阻，定义为物体持续传热功率为 1W 时，导热路径两端的温差，单位为 K/W 。热阻的概念与电阻非常类似，可以用一个简单的类比来解释热阻的意义，传热量相当于电流，温差相当于电压，则热阻相当于电阻。热阻表示材料对热量传导的阻碍能力，材料的热阻越大，则其对热传导的阻碍能力越强。

测量材料导热系数的方法可分为稳态法和非稳态法两大类。稳态法是在加热和散热达到平衡状态、样品内部形成稳定温度分布的条件下进行测量的方法。非稳态法则是在测量过程中样品内部的温度分布是变化的，测出这种变化得到热扩散率，再利用物体已知的密度和比热求得导热系数，譬如激光闪射法就是一种测量材料导热系数的非稳态方法。本实验介绍一种比较简单的利用稳态平板法（平板热流计法）测量材料导热系数的方法。

1、稳态平板法（平板热流计法）测量材料导热系数的原理

稳态平板法（平板热流计法）测量材料导热系数的原理示意图如图 1 所示，加热面 A 将热量传到待测样品 B，再传到散热面 C（室温）。由于加热面 A 和散热面 B 都是由热的良导体铜板制作的，且与待测样品 B 紧密接触，当达到稳态时可认为其温度就是样品上、下表面的温度 T_1 和 T_2 ，且 $T_1 > T_2$ 。对于样品 B，由于热传导的方向垂直于上、下表面，假设样品厚度为 h ，面积为 S ，当热传导达到稳态时，根据傅里叶热传导定律，样品的传热速率（或热流）可表示为：

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot S \frac{T_1 - T_2}{h} \quad (1)$$

式中 Q 是传递的热量， t 是时间， λ 是导热系数。

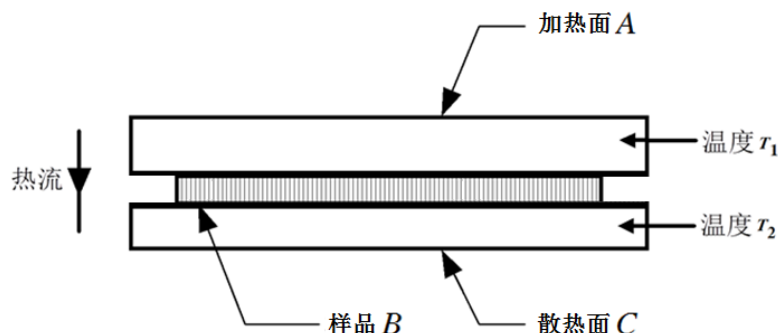


图 1 稳态平板法（平板热流计法）测量材料导热系数的原理示意图

由(1)式可知，只要体系达到稳态之后，通过测量加热面 A 和散热面 B 的温度及其间距，再利用热流计测量样品的传热速率（或热流），就可以利用傅立叶热传导定律计算材料的导热系数，而材料的热阻系数（即热阻）可由其与导热系数的关系计算得到

$$R = \frac{1}{h\lambda} \quad (2)$$

式中， R 是热阻系数（即热阻）， h 是样品厚度， λ 是导热系数。

显然，稳态平板法（平板热流计法）测量材料导热系数具有测试方法简便、快捷、重复性好等优点，可用于多种材料导热系数的测试。

2、不同类型样品的制备及检测方法

材料的种类很广，有金属、非金属、陶瓷、聚合物、复合材料、液态、固态和粉体材料等，此外，材料的导热系数的范围也很宽。通过采用适当的样品制备方法，可利用 DRPL- I 热导率动态测量仪检测大部分材料的导热系数。

2.1 高导热材料的制样及检测方法

平板稳态法导热系数测试仪测量材料导热系数时，主要是测量冷热面温差和热流这两个参量。仪器在测量这两个参量时，都存在测量量程和精度的限制。为此，可通过制备出恰当的样品使得材料的冷热面温差和热流都落在仪器的量程和精度范围内。譬如在测量高导热材料时，要减小热流传递和提高冷热面温差。减小热流可通过减小样品的传热面积来实现，而提高冷热面温差可通过增加样品厚度来实现。样品与冷热板的接触热阻相对于高导热样品的热阻而言是非常大的，测量时必须消除接触热阻。可采用的方法是在样品测量面两端打 2 个温度测量孔，把测量冷热板温度的热电偶插入到样品的温度测量孔内，这样，测量的冷热温差值就不包含接触热阻形成的温差了，当然，样品的厚度要以样品上 2 个温度测量孔的间距来计算。如果热面温度比环境温度高很多，就要考虑样品表面散热，可在样品表面包上保温层。图 2 给出了测量高导热材料譬如铝合金的导热系数的样品及检测方法简图。

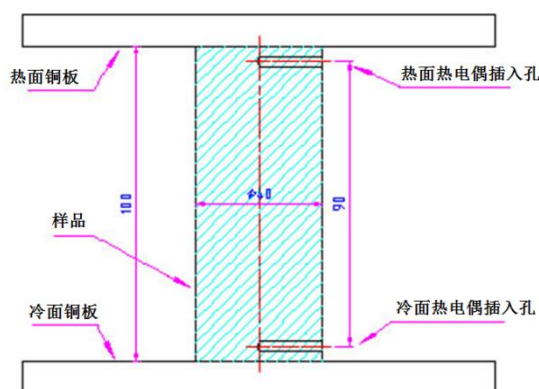


图 2 高导热材料样品及检测方法简图

图 3 给出了高导热管状样品譬如铜管和铝管等的制样及检测方法简图。如图所示，取一段样品，两端磨平，用锯子在管子外壁锯两条槽，用于放置热电偶。样品两端抹上导热硅脂，压在冷热板之间；热电偶槽内抹上导热硅脂，插入热电偶，用夹子或扎带固定，周围填充保温纤维绵。样品管在冷热板之间，形成温度梯度，热电偶可在样品管上取不同的冷热温度点。例如，热面板温度 90°C ，冷面板温度 20°C ，如果需要测量样品在热面 80°C 、冷面 60°C 时的导热系数，可根据样品管的长度和温度梯度在合适的位置锯测温槽。如图 4 所示，

计算 80℃位置： $l=120\times(80-20)/(90-20)\approx103$

计算 60℃位置： $l=120\times(60-20)/(90-20)\approx69$

考虑到样品管与冷热板的接触热阻，计算的数据可各增加 5mm。

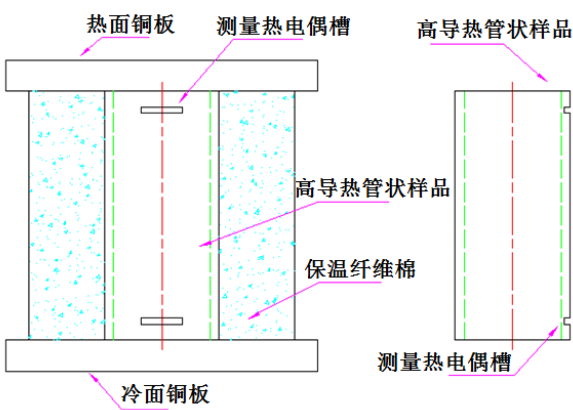


图 3 高导热管状样品及检测方法简图

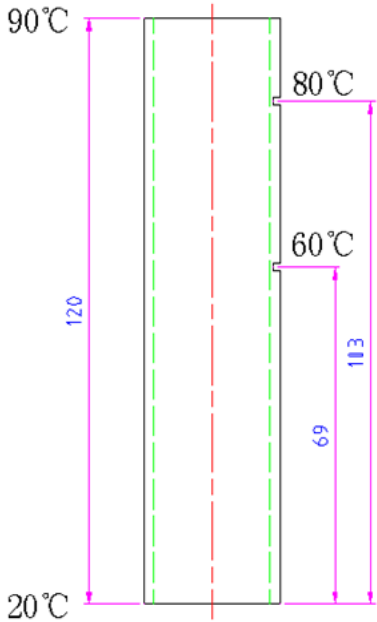


图 4 根据样品管的长度和温度梯度在不同位置（或温度点）放置热电偶

图 5 给出了高导热板状、片状、丝状样品譬如铜板、铝板等的制样及检测方法简图。取一段样品，弯曲成如图所示的形状，用锯子在样品上锯两条用于放置热电偶的槽。样品两端抹上导热硅脂，在样品与冷、热面接触部位中间放置顶柱，压在冷、热板之间。热电偶槽内抹上导热硅脂，插入热电偶，用夹子或扎带固定，周围填充保温纤维棉。样品在冷、热板之间形成温度梯度。可根据样品的长度和温度梯度选取合适的位置（或温度点）放置热电偶，选取方法如上所述。

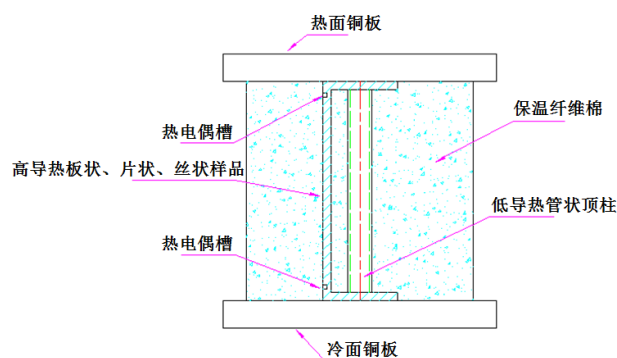


图 5 高导热板状、片状、丝状样品及检测方法简图

2.2 粉状或胶状材料的制样及检测方法

测量胶状物时，要做一个围框，装样时要装满并略高于围框边。粉状料的紧实度与导热系数有很大的关系，要考虑测量什么状态下的导热系数，测量自然状态下的导热系数，要做一个围框，装样时要装满并稍高于围框边。有些粉状料可通过压机制样，可测量不同紧实度下的导热系数。此外，还可使用粘结剂将粉状料粘接成块进行测量。

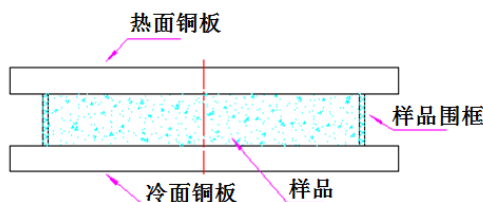


图 6 粉状或胶状样品及检测方法简图

2.3 薄样品的检测方法

非常薄的样品可采用叠层的方法进行测量。

以上是一些特殊材料的制样及检测。实际上，通常检测的都是块状材料。对于块装材料，制样及检测的一般要求是：导热系数小的材料测试面积要大，厚度要薄，温差要大；作为比较，导热系数大的材料测试面积要小，厚度要厚，温差要小。

【实验内容】

1、测量方块状橡胶垫样品的导热系数和热阻

(1) 测量样品尺寸，安装样品

确认样品表面是否洁净，如果样品表面有导热硅脂残留，应使用医用纱布将样品表面清理干净。用游标卡尺测量橡胶垫样品的长、宽和厚度，并记录在实验记录纸上。取下实验主机上的有机玻璃防风罩，旋转手轮，升起上面板。如果上、下铜质面板上有导热硅脂残留，应使用医用纱布将上、下面板表面清理干净。将橡胶垫样品置于面积为 $150 \times 150 \text{mm}$ 的铜板的正中央。旋转手轮，降下上面板，直到四个支撑杆露出 10mm 左右以确保样品被上、下铜质面板夹紧。罩上有机玻璃防风罩。在作为热电偶冷端的保温盒里加入冰水混合物，使其占到保温盒体积的约 90%，尽量冰块多一些，水少一些。

(2) 设定加热温度，等到体系进入稳态后用鼠标点击“开始测量”按钮进行自动测量

打开主机的电源开关、加热开关和风扇开关。打开电脑，启动 DRPL 导热系数测试系统程序。此时，实验主机温控表上的数据应能够在程序界面上相应的显示框中显示，否则通信不正常，请检查通信线和接口是否连接正常，或根据计算机提示查找故障。把样品的厚度和面

积输入到程序界面上相应的输入框。然后，设置加热板的温度。打开主机时，主机仪表盘上的加热器温控表实际显示的是环境温度，通常把加热板的温度设置为比环境温度高 20—30℃。譬如环境温度为 25℃，可以把加热温度设为 45—55℃ 之间。设置完加热温度，再用鼠标点击程序界面上的“启动”按钮，就开始对上面板（加热板）进行加热。等到体系进入稳态后，观察主机仪表盘上的热流计毫伏表的示数，如果示数小于 10，用鼠标点击程序界面上的“停止”按钮停止加热，然后在加热温度设置框内设置更高的加热温度并点击“启动”按钮重新进行加热，直至体系进入稳态后热流计毫伏表的示数大于等于 10。之后，用鼠标点击“开始测量”按钮进行自动测量，测量过程通常需要 0.5—3 小时。测量完成后，程序会自动弹出对话框，要求输入“样品名称”、“操作者姓名”和“检测报告的名称”等信息。填完以上信息，点击确认按钮，就可以自动生成样品导热系数和热阻的测试结果的检测报告。检测报告有两种格式可供选择，一种是 PDF 格式，另一种是 Excel 表格。

一旦测试完成并保存好检测报告，就可以点击“停止”按钮停止对上面板加热，然后点击“停止测试”按钮停止测试，点击“退出程序”按钮退出程序。然后关闭加热、风扇开关，最后关闭仪器电源开关。取下有机玻璃防风罩，旋转手轮，升起上面板，取走样品。

2、测量圆柱形铝合金样品的导热系数和热阻

测量过程与橡胶垫样品的测量过程类似，所不同的是，铝合金样品外面包裹了一层绝热材料，且铝合金样品侧面的上部和下部分别开了 1 个测温孔。使用游标卡尺测量铝合金样品的直径时，要注意铝合金棒直径的测量不包含绝热层。使用游标卡尺测量上、下两个测温孔的距离作为铝合金样品的厚度。把以上测量值记录在实验记录纸上。在样品侧面的两个测温孔中填满导热硅脂，然后把原来插入到上、下面板的热电偶测温端拔出，分别插入到样品侧面的上、下两个测温孔中。热电偶的测温端要插到底。在铝合金样品的上下底面涂抹少量导热硅脂，然后，将样品置于面积为 150×150mm 的铜板的正中央。旋转手轮，降下上面板，直到四个支撑杆露出 10mm 左右以确保样品被上、下铜质面板夹紧。以下测量过程与橡胶垫样品的测量过程大体相同。

3、测量圆柱形石英样品的导热系数和热阻

测量过程与橡胶垫样品的测量过程类似，所不同的是，石英样品不像橡胶样品那样具有弹性，为了确保石英样品与上、下铜质面板有良好的热接触，需要在石英样品的上下底面涂抹适量的导热硅脂，然后，将样品置于面积为 150×150mm 的铜板的正中央。旋转手轮，降下上面板，直到四个支撑杆露出 10mm 左右以确保样品被上、下铜质面板夹紧。以下测量过程与橡胶垫样品的测量过程大体相同。

由于本实验所用的 DRPL-I 热导率动态测量仪（平板热流计法）配备了计算机及 DRPL 导热系数测试系统程序，一旦在程序界面上设置好必要的参数，计算机可自动控制 DRPL-I 热导率动态测量仪完成样品导热系数和热阻的测量。测量完成后，还可以自动生成样品的导热系数和热阻检测结果报告。

【思考题】

1. 已知橡胶的导热系数 $\lambda=0.426 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，石英玻璃的导热系数 $\lambda=1.46 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，纯铝的导热系数 $\lambda=220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，而铝合金的导热系数因成分不同而不同，其导热系数分布在 121 至 180 之间。根据实测值和参考值估算这三种材料的导热系数的相对误差，并分析误差的来源。
2. 本实验使用铜—康铜热电偶测温。为什么冷端要放到冰水混合物中？

【附录】

1. DRPL-I 热导率动态测量仪的主要技术参数

- (1) 导热系数范围：0.015—400 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，精确度小于 5%；

- (2) 热面温度：室温—99.99℃；
- (3) 冷面温度：室温；
- (4) 热面温控：室温—99.99℃，采用平板加热器，双向可控硅控制；
- (5) 冷面采用强制风冷；
- (6) 采用计算机自动测试；
- (7) 采用 WPY 热流计，热流量范围：0.5—2000 W/m²，分辨率 0.25 W/m²；
- (8) 采用有机玻璃防风罩，可直接观察实验过程；
- (9) 冷热板传热面积：150×150 mm；
- 10、冷热板可调节间距：0—160 mm。

2. DRPL- I 热导率动态测量仪的安装调试

- (1) 接上仪器的电源线（220V 50Hz），计算机通讯线，RS485 接口连接在计算机 COM1 口。
- (2) 电脑安装 Office 2003 办公软件，包括 Access 2003 和 Excel 2003。
- (3) 将随机光盘放入光驱中找到应用文件夹，打开文件夹找到 “Setup” 文件，用鼠标点击 Setup。根据提示安装到自定义文件夹或系统默认文件夹。
- (4) 打开仪器电源开关，启动导热系数测试应用程序，仪器数据应进入计算机，否则通信不正常，请检查通信线、接口是否连接正常，或根据计算机提示查找故障。
- (5) 仪器冷热面贴合，静置 12 小时以上，仪器通电 2 小时（注意不能加热），修改热面温度仪表、冷面温度仪表、热面温控仪表的 Sc 参数，使 3 块表温度显示值一致（详细操作请参阅 AL 系列人工智能调节器说明书）。

3. DRPL- I 热导率动态测量仪的操作和使用

- (1) 打开仪器电源开关（观察加热器温控表下显示框是否 Stop 闪动，否则按 “▲” 键，停止运行升温程序），开启电脑，启动 DRPL 导热系数测试系统程序。
- (2) 在程序主界面 “设定温度” 文本框中输入热面温度值，按 “确认设置” 键，此时，加热温控表下显示框出现上显示框的数值与 Stop 交替闪动，否则请重按 “确认设置” 键。再按 “加热启动” 键，此时，加热温控表下显示框出现上显示框的数值并向上增加，否则请重按 “加热启动”，打开仪器 “加热开关”，仪器进入升温状态。再打开 “风扇开关”。
- (3) 装样：将样品冷热面涂上少量导热硅脂，样品放冷热面正中间，压紧样品。如冷热面不是一个平面，用模具垫平，模具 2 个面也要涂上少量导热硅脂，再将测温探头从测量板中拔出，插入模具测温孔中，一定涂上少量导热硅脂。
- (4) 输入样品厚度和样品截面积数据后，按 “确认” 键。
- (5) 输入自动数据记录的时间间隔和次数数据后，按 “确认” 键。
- (6) 按 “自动测试” 键，仪器进入自动测试状态，完成后自动生成报表，请另存到用户指定的位置和文件名。然后关闭 Exec1 程序。实验完毕。
- (7) 重复上述 3、4、5、6、步骤，可检测其它样品。
- (8) 按 “退出程序” 键，退出程序，然后关闭加热、风扇开关，最后关闭仪器电源开关。