

## 导热系数测量方法及仪器

Jurgen Blumm

NETZSCH-Geratebau GmbH, Selb/Bavaria, Germany

编译：曾智强

耐驰仪器（上海）有限公司

### 前言

本文介绍了导热系数测量的基本理论与定义，激光法、热线法、热流法、保护热流法、保护热板法等几类测量方法的原理与应用，以及德国耐驰公司（NETZSCH）的相关仪器。

在某些应用场合，了解材料的导热系数，是测量其热物理性质的关键。例如，耐火材料常被用作炉子的衬套，因为它们既能耐高温，又具有良好的绝热特性，可以减少生产中的能量损耗。航天飞机常使用陶瓷瓦作挡热板。陶瓷瓦能承受航天飞机回到地球大气层时产生的高温，有效防止航天器内部关键部件的损坏。在现代化的燃气涡轮电站，涡轮的叶片上的陶瓷涂层（如稳定氧化锆）能保护金属基材不受腐蚀，降低基材上的热应力。有效的散热器能保护集成电路板与其它电子设备不受高温损坏，散热材料已经成为微电子工业领域关键材料。

在过去的几十年里，已经发展了大量的导热测试方法与系统。然而，没有任何一种方法能够适合于所有的应用领域，反之对于特定的应用场合，并非所有方法都能适用。要得到准确的测量值，必须基于材料的导热系数范围与样品特征，选择正确的测试方法。

### 基本理论与定义

热量传递的三种基本方式是：对流，辐射与传导。对流是流体与气体的主要传热方式，对固态与多孔材料传热不起重要作用。

对于半透明与透明材料，尤其在高温情况下，必须考虑辐射传热。除了材料的光学性质外，边界状况亦能影响传热。关于辐射传热方式的详细介绍见文献<sup>1</sup>。

本文主要讨论的是热传导。热量的传导基于材料的导热性能——其传导热量的能力<sup>2</sup>。厚度为x的无限延伸平板热传导可用Fourier方程进行描述（一维热传递）：

$$Q = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Q 代表单位表面积在厚度(Δx)上由温度梯度(ΔT)产生的热流量。两个因子都与导热系数(λ)相关联。在温度梯度与几何形状固定的情况下，导热系数代表了**稳态下**需要多少能量才能维持该温度梯度。

在对建筑材料（如砖）与绝热材料进行表征时，经常用到k因子。k因子与材料的导热系数和厚度有关。

$$k = \lambda / d$$

这一因子并不能用来鉴别材料，而是决定最终产品厚度的因素。

### 测量装置

如今测量导热系数方法与仪器有许多种。使用 Fourier 方程所描述的稳态条件的仪器主要适用于测量中低导热系数材料。使用动态（瞬时）方法的仪器，如热线法或激光散射法，用于测量中高导热系数材料。

## 稳态方法

### 1. 热流法导热仪：

如图 1 所示，将厚度一定的方形样品（例如长宽各 30cm，厚 10cm）插入于两个平板间，设置一定的温度梯度。使用校正过的热流传感器测量通过样品的热流。测量样品厚度、温度梯度与通过样品的热流便可计算导热系数。

图 2 示出了一种新型的热流法导热仪（HFM 436 系列）。样品的厚度可达到 10cm，长与宽可达 30 或 60cm。测量温度为 -20℃ 到 100℃ 之间（取决于不同的型号）。这种仪器能测量导热系数在 0.005 到 0.5W/m · K 之间的材料，通常用于确定玻璃纤维绝热体或绝热板的导热系数与 k 因子。该仪器的优点是易于操作，测量结果精确，测量速度快（仅为同类产品的四分之一），但是温度与测量范围有限。

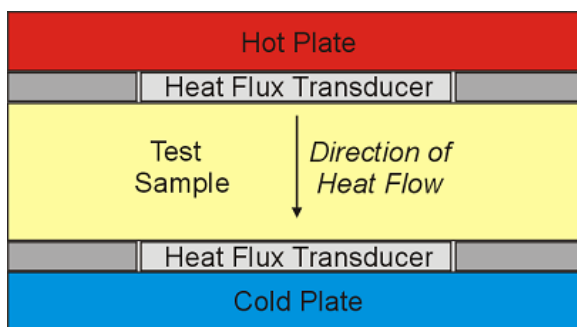


图 1 热流法测量原理



图 2 NETZSCH HFM436 Lambda 热流法导热仪，适用于绝热材料。

### 2. 保护热流法导热仪：

对于较大的、需要较高量程的样品，可以使用保护热流法导热仪。其测量原理几乎与普通的热流法导热仪相同。不同之处是测量单元被保护加热器所包围，因此测量温度范围和导热系数范围更宽。

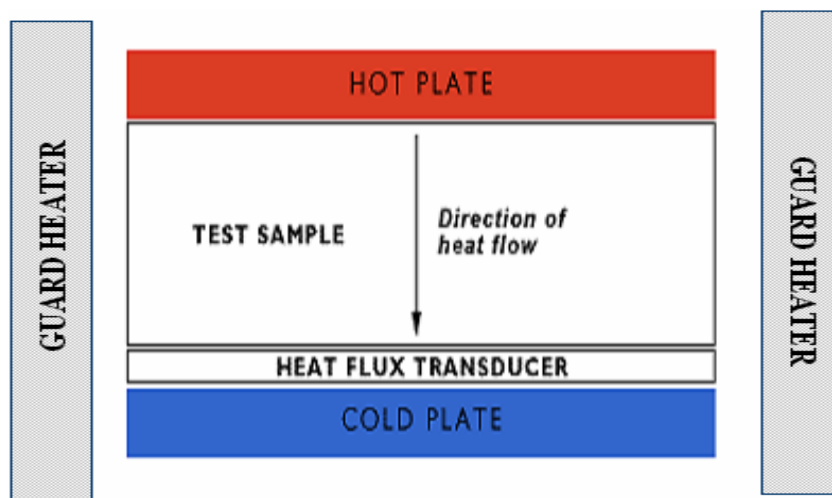


图 3. 保护热流法测量原理

### 3. 保护热板法导热仪：

热板法或保护热板法导热仪的工作原理和使用热板与冷板的热流法导热仪相似。保护热板法的测量原理如图 3 所示。热源位于同一材料的两块样品中间。使用两块样品是为了获得向上与向下方向对称的热流，并使加热器的能量被测试样品完全吸收。测量过程中，精确设定输入到热板上的能量。通过调整输入到辅助加热器上的能量，对热源与辅助板之间的测量温度和温度梯度进行调整。热板周围的保护加热器与样品的放置方式确保从热板到辅助加热器的热流是线性的、一维的。辅助加热器后是散热器，散热器和辅助加热器接触良好，确保热量的移除与改善控制。测量加到热板上的能量、温度梯度及两片样品的厚度，应用 Fourier 方程便能够算出材料的导热系数。

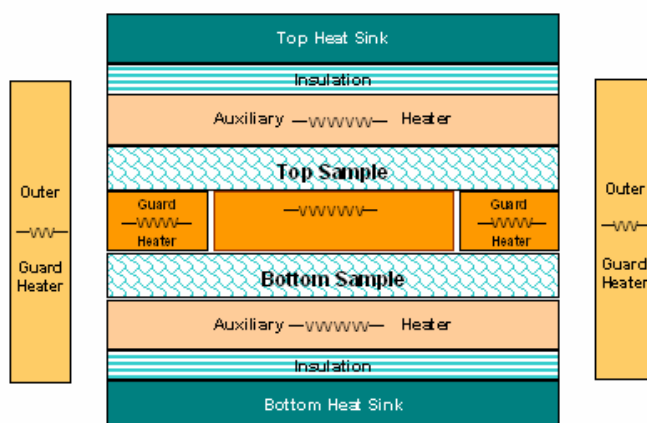


图 4. 保护热板法导热仪结构原理图

相比热流法，保护热板法的优点是温度范围宽（-180 到 650℃）与量程广（最高可达 2W/m · K）。此外，保护热板法使用的是绝对法——无需对测量单元进行标定。

### 动态（瞬时）测量法

动态测量法是最近几十年内开发的导热系数测量方法，用于研究中、高导热系数材料，或在高温度条件下进行测量。动态法的特点是精确性高、测量范围宽（最高能达到 2000℃）、样品制备简单。

#### 热线法：

热线法是在样品（通常为大的块状样品）中插入一根热线。测试时，在热线上施加一个恒定的加热功率，使其温度上升。测量热线本身或与热线相隔一定距离的平板的温度随时间上升的关系。

测量热线的温升有多种方法。其中交叉线法是用焊接在热线上的热电偶直接测量热线的温升。平行线法是测量与热线隔着一定距离的一定位置上的温升。热阻法是利用热线（多为铂丝）电阻与温度之间的关系测量热线本身的温升。一般来说，交叉线法适用于导热系数低于  $2\text{W/m} \cdot \text{K}$  的样品，热阻法与平行线法适用于导热系数更高的材料，其测量上限分别为  $15\text{W/m} \cdot \text{K}$  与  $20\text{W/m} \cdot \text{K}$ 。

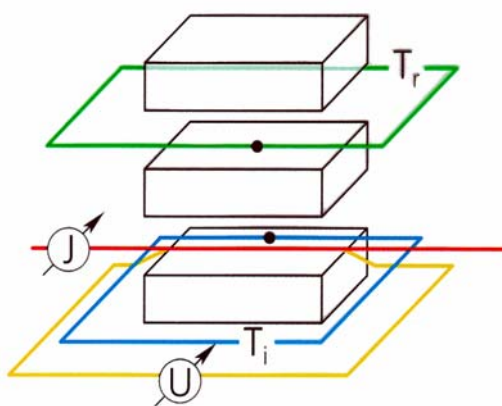


图 5. 热线法导热仪结构原理图（平行线法）

耐驰公司的热线法仪器可以使用上述全部三种方法，测试温度范围为室温至 1500℃。测试时将样品加热到所需的温度，待样品温度稳定后，就能开始进行热线测量。这一方法能够测量体积较大的样品。

#### 激光闪射法：

激光闪射法直接测量材料的热扩散性能。在已知样品比热与密度的情况下，便可以得到样品的导热系数。激光闪射法的特点是，测量范围宽（ $0.1\sim 2000\text{W/m} \cdot \text{K}$ ）测量温度广（ $-110\sim 2000^\circ\text{C}$ ），并适用于各种形态的样品（固体、液体、粉末、薄膜等）。此外，激光闪射法还能够用比较法直接测量样品的比热；但推荐使用差示扫描量热仪，该方法的比热测量精确度更高。密度随温度的改变可使用膨胀仪进行测试<sup>4</sup>。

应用激光闪射法时，样品在炉体中被加热到所需的测试温度。随后，由激光器产生的一束短促激光脉冲对样品的前表面进行加热。热量在样品中扩散，使样品背部的温度上升。用红外探测器测量温度随时间上升的关系。

图 6 是一种新型的激光闪射仪的示意图<sup>5</sup>。Nd:GGG-激光头位于仪器下部位，样品放置在管状炉体中央的样品支架上。不同类型的炉子可达到的最高测试温度不同，最高可达 2000℃（石墨炉体）。用 InSb 检测器测量样品背部的温升，该检测器位于系统的顶部。仪器的垂直结构确保了良好的信噪比与样品形状的灵活性。该仪器既能够测量液体与粉末样品，也能测量不同几何形状的固体样品。

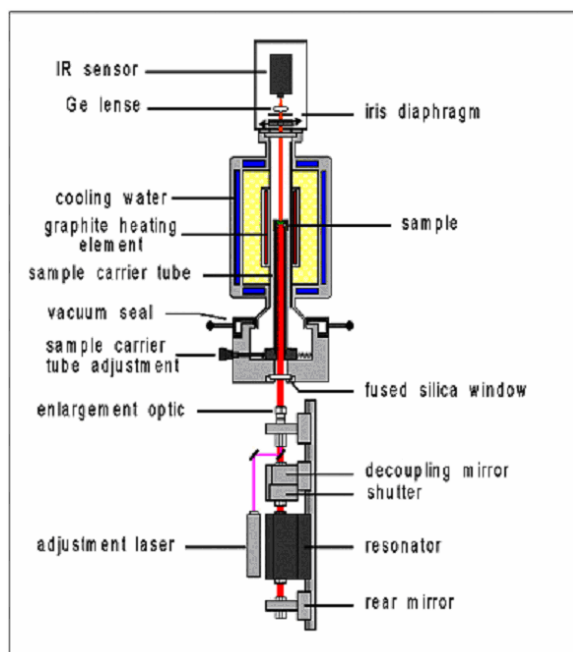


图 6. 激光导热仪（NETZSCH LFA427）的原理图

图 7 为另一种闪光扩散法导热仪，特别适用于测量包装材料或电子工业中的散热片。这一仪器测量温度较低，最高 300℃。



图 7. NETZSCH LFA 447 激光导热仪

由于其高效率、高精度度以及样品兼容性好，激光闪射法已经进入工业研发与质控的许多领域：导热系数小于  $0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  的耐火材料，到导热系数大于  $2000 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  的金刚石。该仪器还能测量多层系统，如对于涡轮叶片上的热保护涂层的检测。

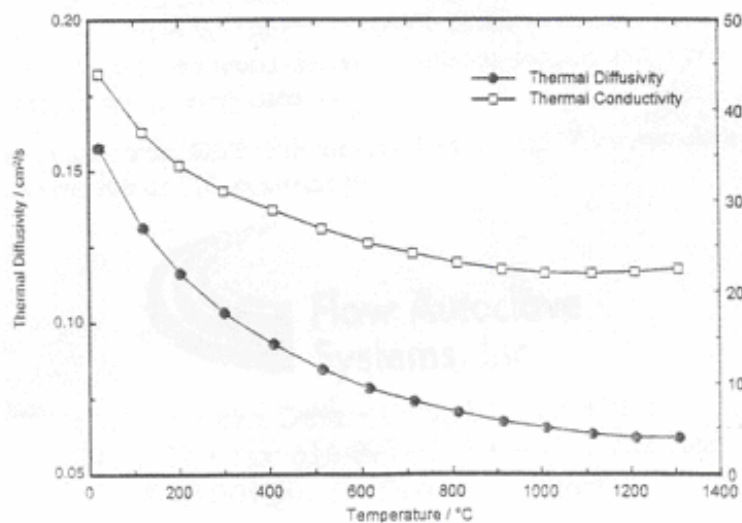


图 8. 碳化硅纤维填充 MoSi<sub>2</sub> 在室温到 1300℃ 的热扩散系数和导热系数。用激光闪射法测量。

图 8 是二硅化钼 MoSi<sub>2</sub>（常用作高温炉体的加热元件）的热扩散性能与导热性能测试结果。测量导热系数所需的比热由差示扫描量热法进行测量。可以清楚地看到热扩散率与导热系数均随温度上升而显著下降。在整个测量温度范围内，导热系数下降了约 50%。在材料应用中必须考虑到这些现象，以防止出现某些问题，如在使用 MoSi<sub>2</sub> 作为加热元件的炉体中出现温度分布不均匀。

## 结 论

热物性，如热扩散率与导热系数，对于材料的应用十分重要。必须精确测量这些性质，以防止出现质量问题，并促进材料在和热相关的领域应用范围的不断扩大。

由于导热性能有许多种测量方法，事先必须考虑到材料导热系数的大致范围，以及使用温度的大致范围，以选用正确的测量方法。

## 参考文献

- [1] Siegel, R., and Howell, J.R., Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill, Kogakusha Ltd., Tokyo, 1972.
- [2] Incropera, F.P., and Dewitt, D.P., Introduction to Heat Transfer, Third Ed., John Wiley & Sons, New York/Toronto, 1996.
- [3] Parker, J.W., Jenkins, J.R., Butler, P.C. and Abbott, G.I., “Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity,” J. Appl. Phys., 32, 1961. pp. 1679-1685.
- [4] Blumm, J., “Dilatometrie an keramischen Werkstoffen,” Das Keramiker Jahrbuch 2000, Goller Verlag, Baden-Baden, 1999.
- [5] Brauer, G., Dusza, L., and Schulz, B., “New Laser Flash Equipment LFA 427,” Interceram, 41, 1992, pp. 489-492.