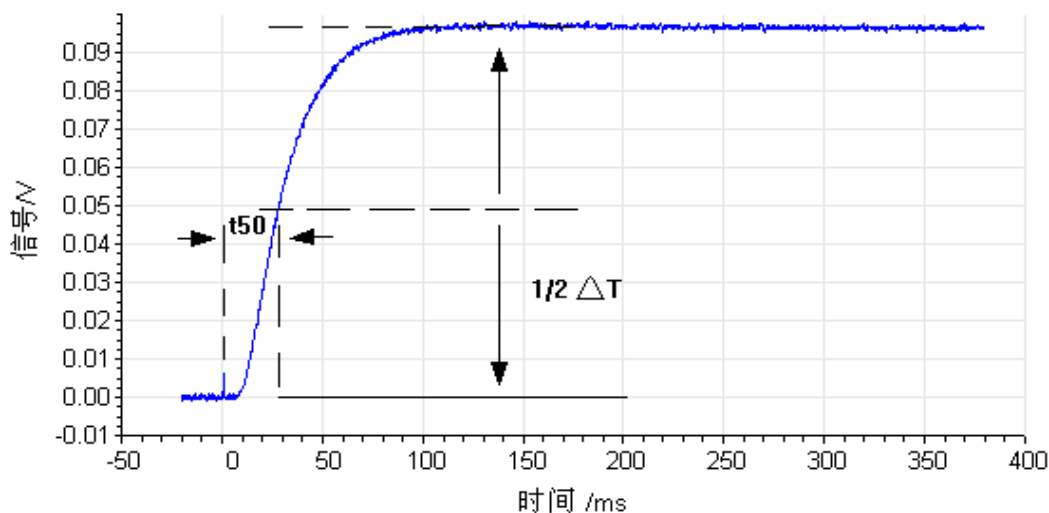
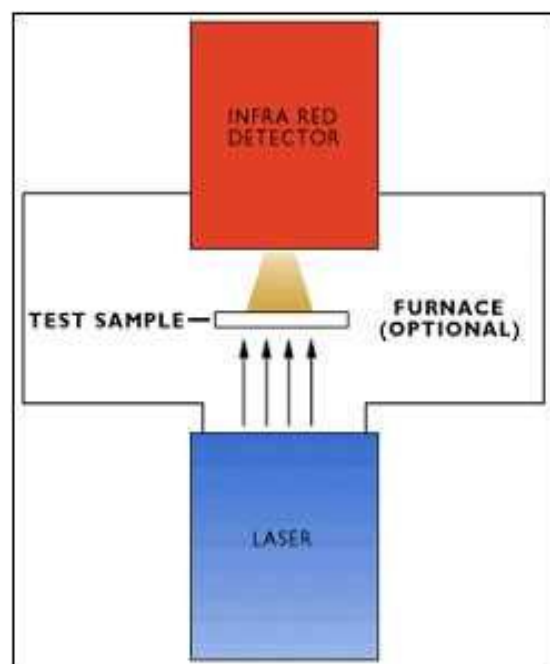


激光闪射仪（LFA）基本原理

文件编号: cPH60-LFA-01

激光闪射法是一种用于测量材料导热性能的常用方法，属于导热测试“瞬态法”的一种。测量基本原理如下图所示：

图中在一定的设定温度 T （恒温条件）下，由激光源（或闪光氙灯）在瞬间发射一束光脉冲，均匀照射在样品下表面，使其表层吸收光能后温度瞬时升高，并作为热端将能量以一维热传导方式向冷端（上表面）传播。使用红外检测器连续测量上表面中心部位的相应温升过程，得到类似于下图的温度（检测器信号）升高对时间的关系曲线：



若光脉冲宽度接近于无限小或相对于样品半升温时间近似可忽略，热量在样品内部的传导过程为理想的由下表面至上表面的一维传热、不存在横向热流，且在样品吸收照射光能量后温度均匀上升、没有任何热损耗（表现在样品上表面温度升高至图中的顶点后始终保持恒定的水平线而无下降）的理想情况下，则通过下列方程：

$$\alpha = 0.1388 * d^2 / t_{50}$$

- d: 样品的厚度
- t_{50} : 半升温时间，又称 $t_{1/2}$ ，如图所示为在接收光脉冲照射后样品上表面温度（检测器信号）升高到最大值的一半所需的时间

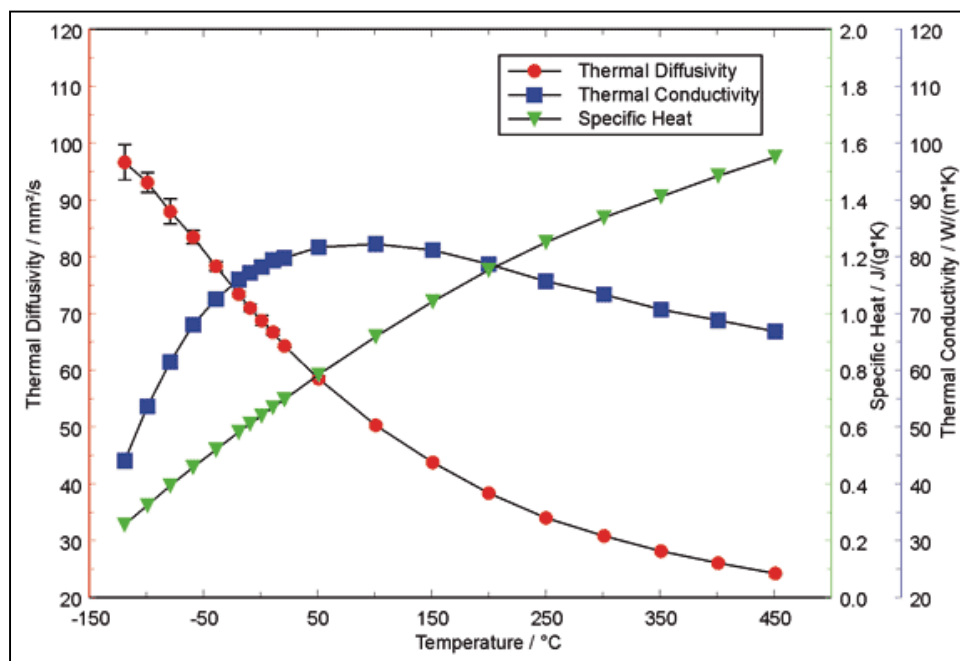
即可得到样品在温度 T 下的**热扩散系数** α 。

对于实际测量过程中任何对理想条件的偏离（如由边界热传导、气氛对流、热辐射等因素引起的热损耗；由材料透明 / 半透明引起的内部辐射热传导； t_{50} 很短导致光脉冲宽度不可忽略等），需使用适当的数学模型进行计算修正。

由于导热系数（热导率）与热扩散系数存在着如下的换算关系：

$$\lambda(T) = \alpha(T) * C_p(T) * \rho(T)$$

在已知温度 T 下的热扩散系数、比热与密度的情况下便可计算得到温度 T 下的**导热系数** λ 。其中这里所用的密度 ρ 是表观密度（又称体积密度，即质量/表观体积），一般在常温下测试，其随温度的变化可使用材料的热膨胀系数表进行修正，在测量温度不太高、密度变化不太大的情况下也可近似认为不变。**比热** C_p 可使用文献值、可使用差示扫描量热法（DSC）测量，在样品形状规则而表面光滑的情况下也可在 LFA 仪器中与热扩散系数同时测量得到（比较法）。方法是使用一个与样品几何尺寸相近、热物性相近且比热值已知的参比样品，与待测样品同时进行表面石墨喷覆（确保与样品具有相同的表面光能吸收比与红外发射率），并在等同的照射条件下进行测量，利用温升信号高度与热容成反比的关系，计算求取样品的比热值。

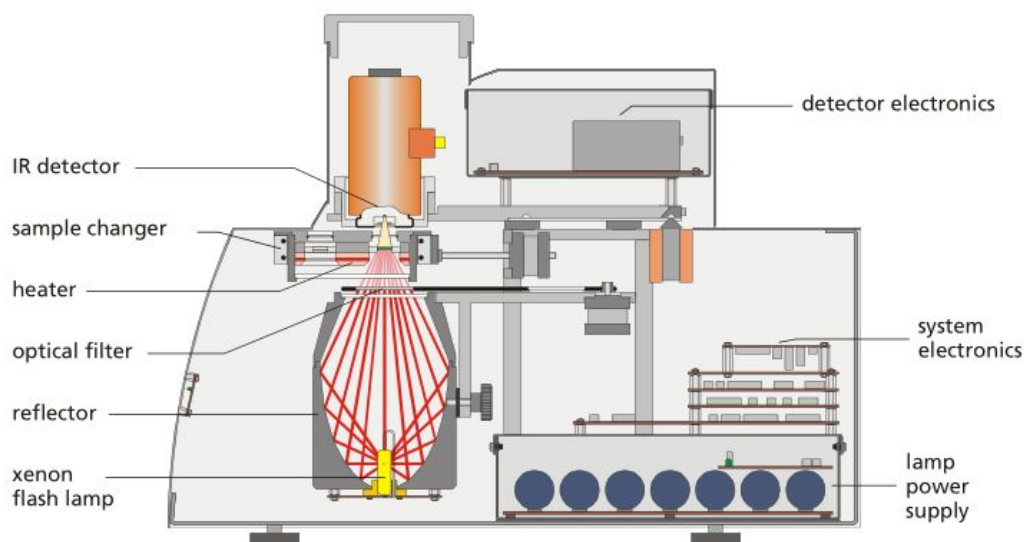


上图所示为某一典型的 LFA 测试图谱。样品为多晶石墨，测试温度范围 -120...450°C。红色曲线显示的是热扩散系数随温度上升而下降的过程，绿色曲线为比热随温度上升而上升，蓝色曲线则为导热系数随温度的变化过程。

激光闪射导热测试方法所要求的样品尺寸小，测量速度快，精度高，能够覆盖 $<0.1...2000\text{W/m}\cdot\text{K}$ （从较低导热系数的聚合物，到超高导热的金刚石）的宽广的导热系数测量范围，测量温度范围宽，样

品适应面广，不仅能测量普通固体样品的导热性能，通过使用合适的夹具或样品容器并选用合适的热学计算模型，还可测量诸如液体、粉末、纤维、薄膜、熔融金属、膏状材料、基质上的涂层、多层复合材料、各向异性材料等特殊样品的热扩散系数并进而计算导热系数。因此在现代导热测试领域，这一测量方法正扮演着越来越重要的角色。

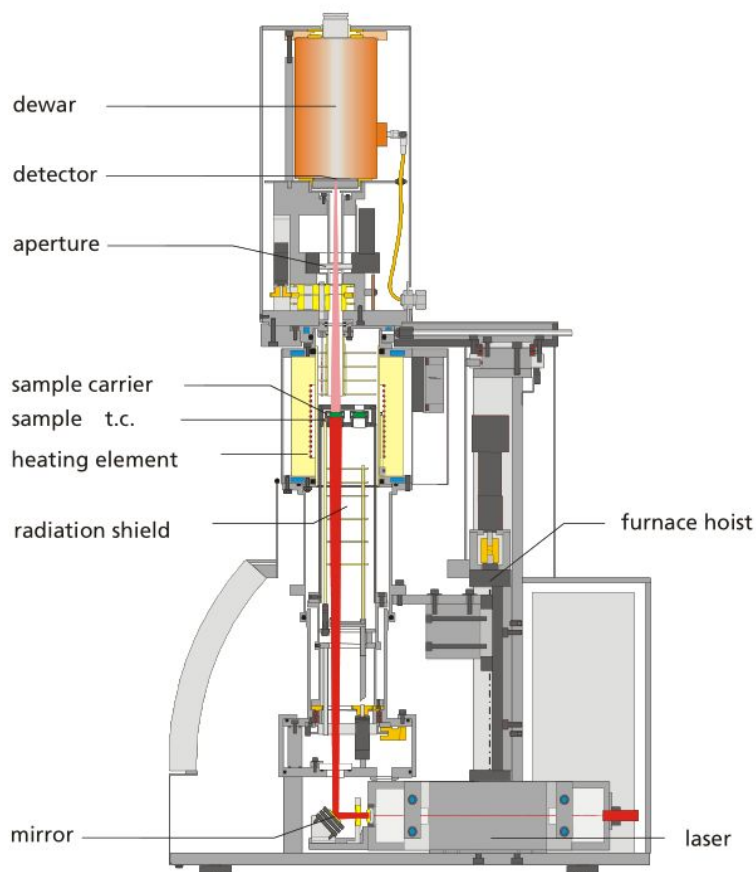
现代的 LFA 仪器结构较为复杂。除了基本的加热炉体、样品支架、激光源（或氙灯光源）与红外检测器外，还有电子控制部分、软件，以及一系列的辅助设备。下图所示为 Netzsch LFA447 Nanoflash® 的结构示意图：



LFA447 的温度范围为 RT...300℃。加热区（heater）中内置二或四样品的自动样品切换器（sample changer）。氙灯光源（xenon flash lamp）位于加热区下方，其发射光经 reflector 反射汇聚后，经过 optical filter 过滤，照射在样品下表面。红外检测器（IR detector）则位于加热炉上方，检测样品上表面的温度升高过程，并将信号传送到计算机中作图。

上图的右侧，则是一些电子模块（detector electronics, system electronics），以及氙灯的供电电源（lamp power supply）。

下图所示为 Netzsch LFA457 Microflash® 的结构示意图，该款产品的结构更复杂些：



炉体（furnace，内含发热体 heating element）位于仪器的中部，使用炉体提升装置（furnace hoist）进行开启/关闭操作。炉体内有三样品位自动切换的样品支架（sample carrier）。使用样品热电偶（sample t.c.），测量样品的温度。炉体上部与下部均有防辐射片（radiation shield），用于隔绝炉体高温对光源与检测器部分的影响。

激光源（laser）位于下方，使用反射镜（mirror）将激光经反射照射到样品下表面。由位于最上部的红外检测器（detector，因需要在液氮温度下工作，故包裹在杜瓦瓶 dewar 中）检测样品上部的温升信号。具体检测面积使用遮罩（aperture）进行控制。

LFA457 有低温炉、高温炉两种炉体可选，覆盖-125...1100℃的宽广温度范围。

LFA457 可以外接吹扫气，在一定的惰性气氛下进行测试。吹扫气流量可控。

LFA457 为真空密闭结构，可以外接真空泵，一方面可以进行抽真空与气体置换操作，能够有效保证惰性吹扫气氛的纯净性。另一方面还可在真空下进行测试。

在常规的片状样品检测方面，Netzsch LFA 提供较多可选的尺寸规格，如 $\phi 12.7\text{mm}$ 、 $\phi 25.4\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ 、方 $10 \times 10\text{mm}$ 、方 $8 \times 8\text{mm}$ 、方 $6 \times 6\text{mm}$ ，等等，均有相应尺寸的样品托盘可选。

在比热测试标样方面，Netzsch 提供多种材质的比热标样，如 POCO Graphite、Al₂O₃、Pyroceram、Pyrex、Copper、Inconel、Stainless Steel、Pure Iron 等，以匹配不同热物性的样品测试需求。

除了常规的片状样品检测外，Netzsch 还提供多种多样的特殊测量模式，如液体样品、熔融金属、粉末、纤维、In-plane 水平测试、Laminar 层状样品测试、压力夹持测试、双层模式、三层模式、接触热阻测试、Matrix 矩阵扫描测试等。详见相关的测试说明。所有这些特殊模式，都是为了适应当代

材料学发展趋势下用户千变万化的测试需求，拓展激光导热这一测量技术的应用空间。

LFA 部分相关国际标准：

ASTM E-1461: Standard Test Method for Thermal Diffusivity of Solids by the Flash Method
DIN EN 821

耐驰科学仪器商贸（上海）有限公司 应用实验室
徐梁

初稿：2005. 7.

最后修订于：2013. 7.

技术支持邮箱：nsi-lab@netsch.com

www.netsch.cn