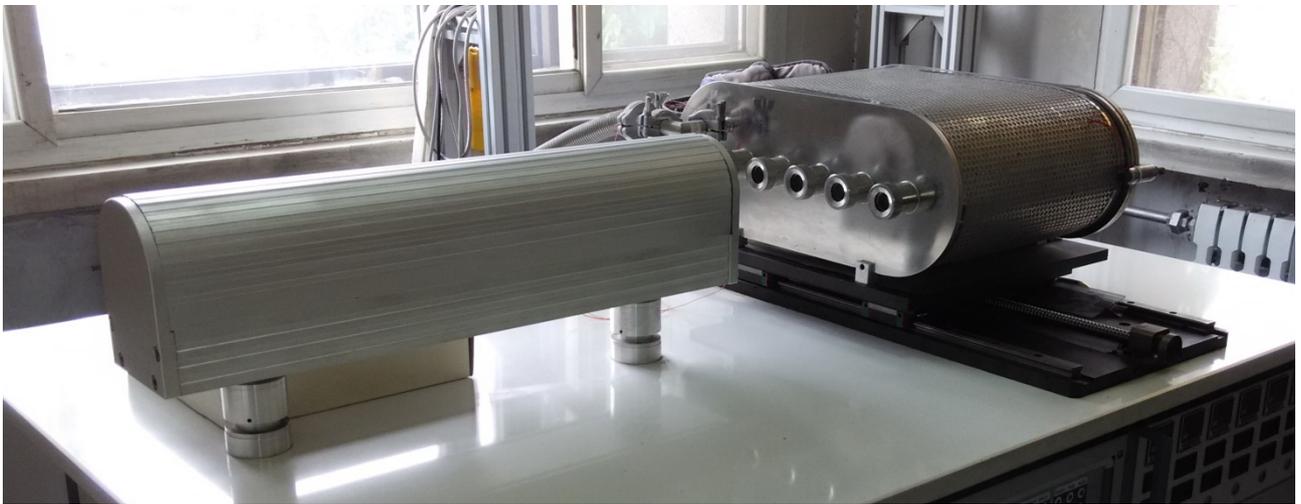


闪光法热物性测试技术应用——Application Note: 004

## 导热材料热扩散系数闪光法测量中的 样品厚度选择

Sample Thickness Selection for Thermal Diffusivity Measurement of  
Thermal Conductive Materials by Flash Method



**摘要：**本文主要针对各向同性、有限尺寸、高导热材料样品因闪光加热所引起的非一维传热过程，建立与实际测试更接近的传热模型，采用数值计算方法分析闪光法测试中的背温曲线测量误差，由此明确闪光光斑尺寸、样品截面积和样品厚度三者关系以及它们对测量误差的影响，从而指导试验参数和样品尺寸的正确选择，其中更侧重于样品厚度对测量误差的影响以及样品厚度的正确选择。

**关键词：**热扩散系数、闪光法、导热材料、厚度、优化

## 1. 引言

对于高导热材料，如各种金属材料和高导热陶瓷材料，它们的热性能普遍采用闪光法进行测量，特别是热性能中的热扩散系数测试更是闪光法的最大优势，因为闪光法可以在短时间内使用最低样品材料消耗成本实现热扩散系数测量，而且闪光法也是目前热性能测试温度范围跨度最大的测试方法之一，测试温度范围可从低温-190℃至超高温 3000℃，同时还可以在各种气氛和压力环境下进行测试。

闪光法的基本原理是脉冲光照射被测样品前表面，样品前表面薄层上吸收脉冲光辐照能量，探测器同时记录热量传递到样品背面所引起的温度随时间的变化。实验结果表明该方法能得到热扩散系数和比热容，而导热系数可以通过下式计算得到：

$$\alpha = 1.37L^2 / (\pi^2 \tau_{0.5}) \quad (1)$$

$$c = Q / (T_{\max} \rho L) \quad (2)$$

$$\lambda = \alpha c \rho \quad (3)$$

式中  $\alpha$  表示热扩散系数，单位  $m^2/s$ ； $L$  表示样品厚度，单位  $m$ ； $\tau_{0.5}$  表示样品背面温升达到最大值所需时间的一半，单位  $s$ ； $c$  表示比热容，单位  $J/(kg \cdot K)$ ； $Q$  表示样品所吸收的热流密度，单位  $W/m^2$ ； $T_{\max}$  表示样品背面温升最大值，单位  $K$ ； $\lambda$  表示样品材料导热系数，单位  $W/(mK)$ ； $\rho$  代表样品密度，单位  $kg/m^3$ 。

对公式(1)~(3)的分析表明，闪光法测定热性能的误差主要取决于背温曲线中  $\tau_{0.5}$  和  $T_{\max}$  的准确度。然而，到目前为止很少有文献报道准确评估材料热特性闪光法测试误差大小，这主要是因为大多数文献报道都是假设样品中的传热过程以及样品局部位置上的热流密度是一维形式，而实际测试中往往不是如此。

本文主要针对各向同性、有限尺寸、高导热材料样品因闪光加热所引起的非一维传热过程，建立与实际测试更接近的测试模型，采用数值计算方法分析闪光法测试中的  $\tau_{0.5}$  和  $T_{\max}$  测量误差，由此明确闪光光斑尺寸、样品截面积和样品厚度三者关系以及它们对测量误差的影响，从而指导试验参数和样品尺寸的正确选择。目前闪光法测试仪器基本都是商品化设备，闪光光斑尺寸和样品截面积尺寸基本都已固定，所以本文将侧重于研究各向同性高导热材料闪光法热扩散系数测量中厚度选择对测量误差的影响，以此来指导样品厚度的正确选择。

## 2. 测试模型

在闪光法测试中，当一个闪光短脉冲作用在有限尺寸样品前表面时，实际热量传递是一个三维非稳态导热形式，设定被测样品是一个长方形板材，其厚度为  $L$ 、宽度为  $H$  和高度为  $W$ ，如图 2-1 所示。

在样品的前表面位置  $x=0$  处, 样品中心部分表面受到高功率脉冲能量  $q$  辐照加热, 相应的光斑尺寸分别为  $\Delta y \times \Delta z$ , 其中  $\Delta y = y_2 - y_1$ ,  $\Delta z = z_2 - z_1$ 。加热热流密度和闪光脉冲时间参数的选择对应于测试设备中的闪光灯, 同时还要考虑测试方法中的一般条件: 即要使得样品背面温度升高不少于  $3 \sim 6$  K, 相应的闪光光源所对应的热流密度范围为  $q = 3 \times 10^7 \sim 3.6 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ 、闪光脉冲持续时间范围为  $\tau_p = 0.1 \sim 5 \text{ msec}$ 。

为了便于分析计算和说明问题, 假设样品与外界环境不存在热交换, 即样品处于绝热环境 and 不存在辐射热损失, 并同时假设样品材料的热性能在小温度范围内的变化无关。

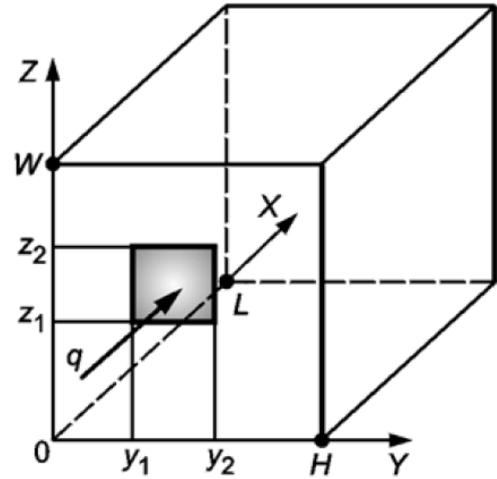


图 2-1 闪光法测量前表面加热三维传热模型

这一假设对于许多材料在实验过程中可能的温度变化范围是完全合理, 即使对于具有短脉冲宽度的高热流也是如此。由此这个传热问题就可以简化为如下非稳态热传导问题和初始边界条件的求解:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$x=0: -\lambda(\partial T / \partial x) = q, y_1 \leq y \leq y_2, z_1 \leq z \leq z_2, t > 0; \quad (5)$$

$$x=0: \lambda(\partial T / \partial x) = 0, y < y_1, y > y_2, z < z_1, z > z_2, t > 0; \quad (6)$$

$$x=L: \lambda(\partial T / \partial x) = 0, 0 < y < H, 0 < z < W, t > 0; \quad (7)$$

$$y=0: \lambda(\partial T / \partial y) = 0, 0 < x < L, 0 < z < W, t > 0; \quad (8)$$

$$y=H: \lambda(\partial T / \partial y) = 0, 0 < x < L, 0 < z < W, t > 0; \quad (9)$$

$$z=0: \lambda(\partial T / \partial z) = 0, 0 < x < L, 0 < y < H, t > 0; \quad (10)$$

$$z=W: \lambda(\partial T / \partial z) = 0, 0 < x < L, 0 < y < H, t > 0; \quad (11)$$

$$t=0: T = T_0 \quad (12)$$

式中的  $T$  和  $T_0$  表示当前温度和初始温度,  $t$  表示时间。另外, 由于在  $z$  轴和  $y$  轴上的对称性, 所以整个三维传热可以简化为一个二维传热模型。

对于典型的测量试验, 在初始温度  $T_0 = 293 \text{ K}$  条件下进行分析, 其中样品厚度范围为  $1 \sim 5 \text{ mm}$ 。

对于上述测试模型有多种方法可以求解, 如数值差分法、瞬态有限元法和分析计算软件, 如 MapleSim、SimulationX 和 Matlab 等, 这里不做详细介绍, 只给出分析计算结果和讨论。

为了更有效描述二维传热模型对闪光法测量误差的影响, 选择了四种高导热典型结构材料铜、锌、不锈钢和碳化钨进行分析, 表 2-1 中给出了材料的热特性数据。

表 2-1 材料的热性能数据

材料	$c, J / (kg \cdot K)$	$\rho, kg / m^3$	$\alpha \times 10^{-6}, m^2 / s$	$\lambda, W / (m \cdot K)$
铜	381.0	8800	114	384
锌	387.4	6920	43.3	116
不锈钢	460.0	7800	12.8	46
碳化锆	456.3	6520	6.72	20

根据上述建立的二维传热模型，分别从一维到二维传热形式对闪光法测试模型进行分析，并对分析结果进行讨论。其中一维模型分析用于确定样品厚度变化对测量误差的影响，二维模型分析用于确定样品横截面大小与闪光光斑尺寸大小对测量误差的影响。

### 3. 一维传热模型分析及结果

首先分析一维传热模型下的闪光法测量误差，闪光法一维传热模型如图 3-1 所示，即一个有限时间宽度  $\tau_p$  的闪光热脉冲  $q$  作用到样品表面  $x=0$ 。

模型中假设在样品所有表面为绝热状态，即样品表面没有任何热交换，这就是一个典型的厚度为  $L$  的无限大平板非稳态温度场的一维热流传热问题，在这里进行的闪光法误差分析主要是确定测量误差是由于样品的实际厚度和闪光脉冲宽度不是极小而引起。

对于这种典型的一维瞬态传热问题，在初始温度  $T_0 = 293K$  条件下进行数值分析，其中样品厚度从 1mm 到 5mm，所研究材料为表 2-1 中列出的四种典型导热材料。

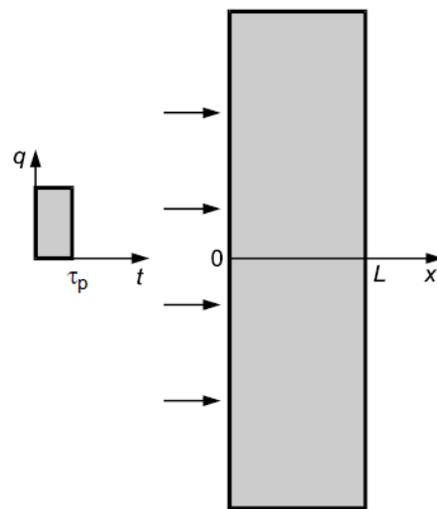
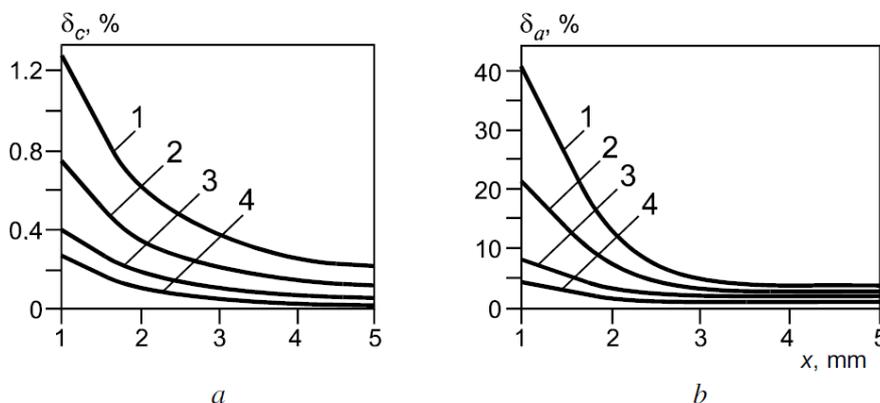


图 3-1 闪光法一维非稳态传热模型

在图 3-2(a)和(b)中显示了测量不同材料在不同厚度时的比热容和热扩散系数测量误差  $\delta_c$ 、 $\delta_\alpha$ ，其中的加热脉冲宽度为  $\tau_p = 1.5msec$ 。从图中可以看出，测量误差  $\delta_c$  和  $\delta_\alpha$  取决于样品的导热系数。对于 1 mm 厚度的样品，铜的测量误差最大，其比热容误差  $\delta_c > 1.2\%$ 、热扩散系数误差  $\delta_\alpha > 40\%$ 。随着样品厚度的增加到  $L = 5mm$  时，比热容和热扩散系数误差  $\delta_c$ 、 $\delta_\alpha$  分别降低到 0.3% 和 5% 左右。

图 3-2 比热容和热扩散系数测量误差  $\delta_c$ 、 $\delta_\alpha$  随样品厚度变化分布图：1.铜；2.锌；3.不锈钢；4.碳化锆

为了解释得到的结果，必须考虑闪光法的另一个假设：即在样品前表面的一个无穷小薄层中对无限短时间的辐射热脉冲进行吸收。但在实际情况下热脉冲的持续时间总是有限，并不是无限短时间，这取决于所使用的闪光器类型。在这种情况下，热辐射能量的吸收区域不会是一个无穷小薄层，在估计材料的热特性时必须考虑这种误差。

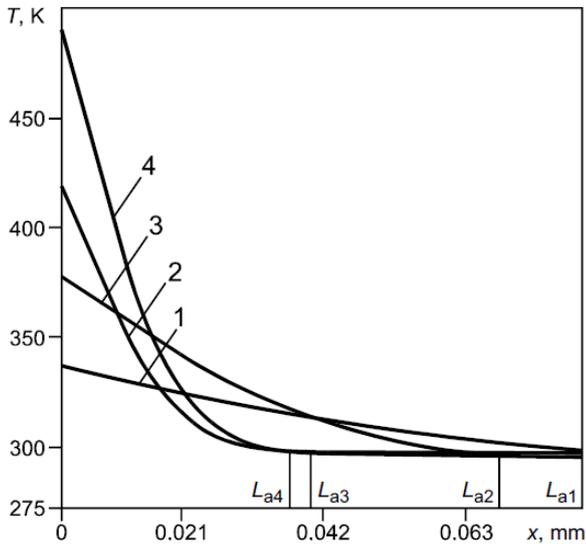


图 3-3 厚度 2mm 样品脉冲宽度 1.5ms 时样品内部的温度分布图：1.铜；2.锌；3.不锈钢；4.碳化硅

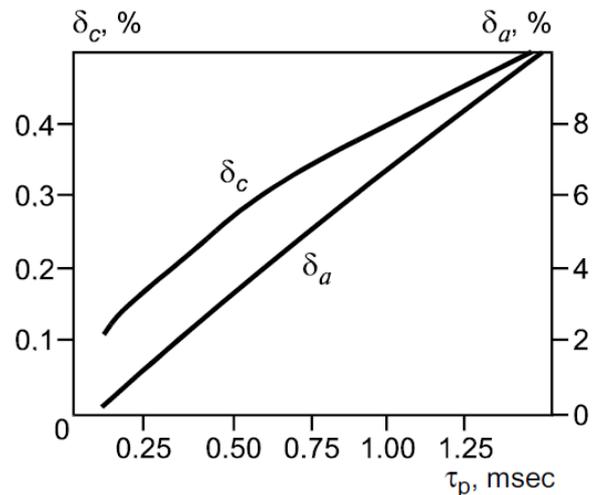


图 3-4 锌样品比热容和热扩散系数测量误差随闪光脉冲时间宽度的变化

如图 3-3 所示，在  $\tau_p = 1.5 \text{ msec}$  的瞬间，对厚度 2 mm 样品内部的温度分布  $T(x)$  进行了数值模拟计算。图中显示出能量吸收区厚度  $L_a$  取决于被测样品材料的导热系数，厚度值可以达到 0.08 mm。

在这种情况下，决定测试试验与理论模型适用性的决定性因素是能量吸收层厚度与被测样品厚度之比  $L_a / L$ ，这个比值越小，测试条件就越符合闪光法理论模型。

因为闪光脉冲的有限时间宽度，特别选择厚度  $L = 1.5 \text{ mm}$  锌材料在闪光热流密度  $q = 3 \times 10^7 \text{ W/m}^2$  照射下进行测试，并在  $\tau_p = 0.1 \sim 5 \text{ msec}$  范围内改变闪光脉冲时间宽度，由此来确定比热容和热扩散系数测量误差。

如图 3-4 所示为样品锌比热容和热扩散系数测量误差  $\delta_c$ 、 $\delta_a$  随闪光脉冲时间宽度  $\tau_p$  的变化，随着脉冲时间宽度  $\tau_p$  的增加，比热容和热扩散系数测量误差都会随之增大，当脉冲宽度增大到  $\tau_p = 1.5 \text{ msec}$  时，比热容测量误差增大到 0.5%，而热扩散系数测量误差则增大到接近 10%。

从以上数值分析结果可以看出，采用闪光法测量导热材料热性能时要对被测样品厚度和加热脉冲的持续时间进行严格限制。当以上被测样品厚度小于 1 mm 时，采用  $\tau_p = 1.5 \text{ msec}$  闪光脉冲进行加热会使得热扩散系数测量误差  $\delta_a$  会超过 40%。造成测量误差巨大是因为实际样品厚度使得  $L_a / L$  比例太大，因此高导热材料测试中使用非常薄的样品是错误的。同样重要的是，测量误差会因为材料导热系数的增加而增大，导热系数越大、样品吸收闪光能量的厚度就越厚，就会越偏离闪光法测试模型而造成更大的测量误差。为了减少热扩散系数测量误差，就需要大幅度减小闪光脉冲时间宽度  $\tau_p$ ，但对于标准的闪光法测试设备而言则不太可能实现。因此，对于高导热材料和薄膜材料的热扩散系数测量，就需要采用类似上海依阳公司出品的大功率超短脉冲闪光法测试设备。

综上所述，基于一维传热模型建立的比热容  $c$  和导热系数  $\lambda$  闪光法测量误差随样品厚度和闪光脉冲时间宽度变化的数值计算方法，从计算结果可以得出结论，在采用闪光法测量导热材料的热扩散系数、

比热容和导热系数过程中，必须要优化被测样品厚度和减小脉冲时间宽度，确定了通过选择被测样品厚度和减小脉冲时间宽度来减小闪光法测量误差的原则，从而更有效的保证闪光法测量精度。

### 4. 二维传热模型分析及结果

对于二维传热模型的数值分析，首先采用不锈钢样品进行计算分析，选择闪光脉冲的热流密度为  $q = 4.25 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ ，初始温度为  $T_0 = 293 \text{ K}$ 。样品被加热的正方形前表面边长尺寸变化范围为  $4 \sim 12 \text{ mm}$ ，厚度  $L = 1 \text{ mm}$ ，在样品前表面的加热光斑尺寸为  $\Delta y = \Delta z = 4 \text{ mm}$ 。

如图 4-1 所示显示了在  $t = 6 \text{ ms}$  时刻样品平面  $z = 6 \text{ mm}$  和  $x = 0.5 \text{ mm}$  上的等温线分布图，其中样品前表面尺寸为  $12 \times 12 \text{ mm}$ 。从图中可以看出，在样品厚度方向上不仅存在着温度变化，在面内方向上也存在着温度变化，由此导致样品背面温升最大值  $T_{\text{max}}$  的减小，即热量在样品内部存在由二维传热所引起的侧向热损。

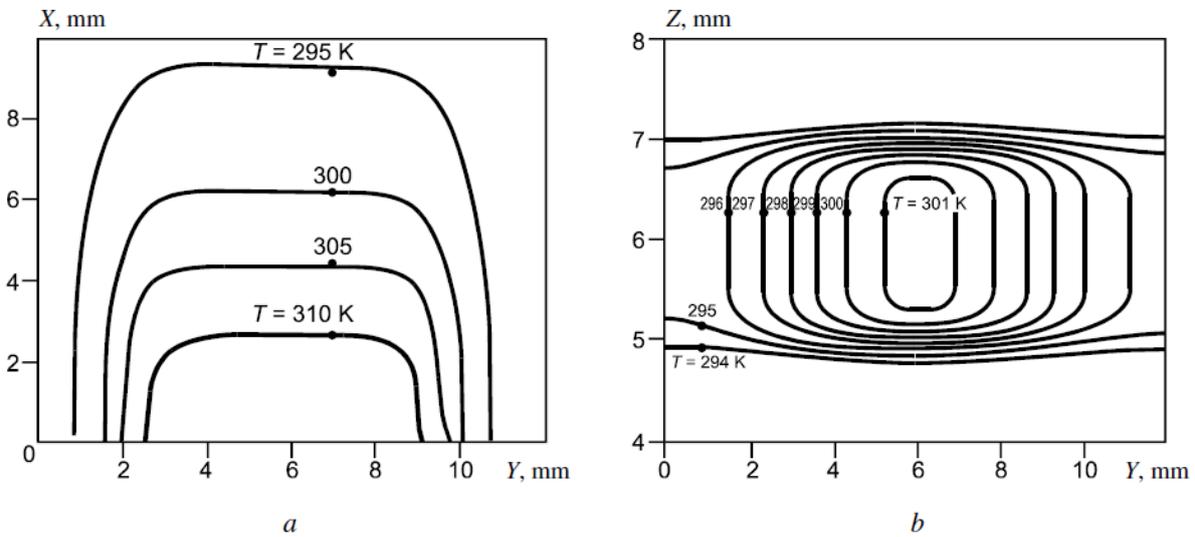


图 4-1 在  $z = 6 \text{ mm}$  时不同横截面上的等温线，(a)  $x = 0.5 \text{ mm}$  位置，(b)  $t = 6 \text{ ms}$  时刻

通过计算程序对数值模拟结果进行的比较可以确定，当试样的整个前表面加热时，温度  $T_{\text{max}}$  和时间  $\tau_{0.5}$  的误差约为 2%，这里假设采用公式(1)~(3)计算热性能。因此，当热扩散系数的误差为 2% 时，测定的比热容误差大约为 2.5%。随着样品前表面面积  $S_h$  的增加，加热光斑大小  $S_l$  的区域保持不变时，所测定的热性能误差会随之增大。

在图 4-2 中描述了根据公式(1)计算得到的热扩散系数误差  $\delta_a$  和根据公式(2)计算得到的比热容测量误差  $\delta_c$  随样品前表面面积与加热面积之比  $S_h / S_l$  的变化曲线。从图中可以看出，如果加热面积保持不变，那么随着样品前表面面积的增加热扩散系数和比热容测量误差都会随之增大，当  $S_h / S_l = 9$  时热扩散系数误差  $\delta_a$  会增大到超过 23%，而比热容误差  $\delta_c$  会增大到超过 250%。

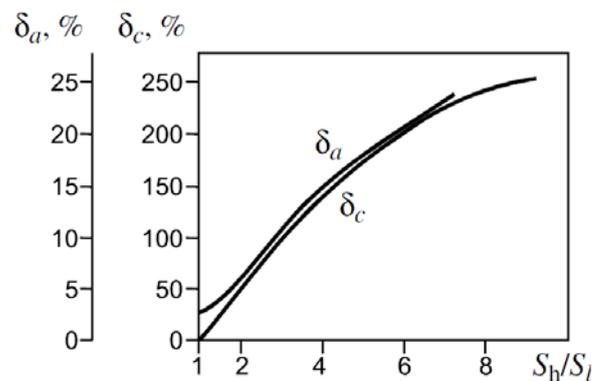


图 4-2 不锈钢样品热扩散系数误差  $\delta_a$  和比热容误差  $\delta_c$  随面积比  $S_h / S_l$  的变化曲线

根据公式(3)和误差计算的一般理论，相应的导热系数测量误差则会超过比热容测量误差。

以上数值分析结果表明，采用闪光法测量样品热性能过程中需要对样品尺寸进行严格限制，样品受热面的面积不得超过加热光斑加热面积。

通过以上对闪光法测试模型分析，可以看到所带来了额外的问题，即样品安装以及样品横向边缘（Y和Z方向上）的绝热问题。在实际测试试验中，对于具有一定形状和尺寸的脉冲加热光斑，样品一般是小直径的薄圆片，为了消除光照辐射与绝缘层相互作用的边缘效应，样品直径必须大于光斑直径至少10%。在这种情况下比热容的测量将高达约20%。基于这些原因，用闪光法测量材料热性能时必须考虑测量热扩散系数 $\alpha$ 、比热容 $c$ 和导热系数 $\lambda$ 所带来的可能误差尺度。

因此，我们从金属样品温度场的数值模拟结果中证明了闪光法中的比热容、热扩散系数和导热系数的测量误差取决于样品截面积与闪光加热区面积的比值。在这个比值的实际变化范围内误差可能高达250%，因此在这类测试中有必要将加热面积和样品横截面积的比值降到最低。

以上是固定样品厚度 $L = 1\text{mm}$ 不变时面积比 $S_h / S_l$ 对热扩散系数测量误差的影响，现在将样品厚度 $L$ 的变化范围设定为 $0.1 \sim 3\text{mm}$ ，样品正方形截面积边长尺寸变化值分别为 $H = 9、12$ 和 $15\text{mm}$ ，同时使得闪光加热脉冲光斑横截面尺寸为样品宽度的80%，即 $\Delta y = y_2 - y_1 = H \times 80\%$ ， $\Delta z = z_2 - z_1 = W \times 80\%$ ，由此对不锈钢和碳化锆两种材料进行数值分析计算。

如图4-3所示描述了不锈钢和碳化锆两种样品材料热扩散系数随样品几何尺寸变化的误差 $\delta_\alpha$ 分析结果。从图中可以看出，测量误差 $\delta_\alpha$ 变化取决于样品厚度，当 $L = 1\text{mm}$ 和 $H = 12\text{mm}$ 时不锈钢和碳化锆的测量误差分别为1.5%和6%，随着样品厚度 $L$ 的增加误差逐渐降低，增加到 $L = 1.4\text{mm}$ 时误差为0.2%，增加到 $L = 1.8\text{mm}$ 时误差降到最小0.05%。

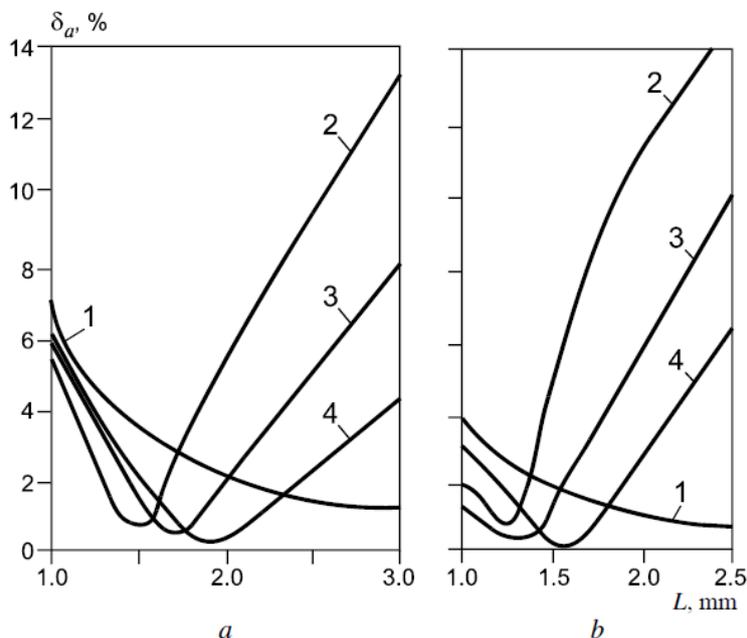


图4-3 两种材料热扩散系数测量误差 $\delta_\alpha$ 随样品几何尺寸变化分析曲线，(a) 碳化锆材料，(b) 不锈钢材料。数字1代表一维热传导时结果，数字2、3、4代表 $H = 9、12$ 和 $15\text{mm}$ 时误差结果（ $\Delta y/H=80\%$ ）

热扩散系数误差 $\delta_\alpha$ 值是在脉冲加热作用停止后热量在样品横截面坐标 $y、z$ 方向上热传递的结果，即热脉冲过程中所积累的能量不仅会沿着 $x$ 坐标方向流动到样品的背面，还会沿着样品表面层横截面 $y、z$ 方向上传递，所以在测试热扩散系数时要考虑两个方向上的热传递效应。这样背温曲线最高温度 $T_{\max}$ 将明显不同于于一维热传导时的结果。对于一维热传导模型，即当考虑一个无限大平板样品时（样品横截面边长比样品厚度 $L$ 大得多），在极限情况下假设 $H、W$ 接近无穷大，相应的加热光斑尺寸也无限大，这

时的热扩散系数测量误差随厚度的变化曲线如图 4-3 中的曲线 1 所示,热扩散系数误差会随着厚度增加而单调降低。

这些横截面尺寸的非一致性影响是决定材料热扩散系数误差的主要原因,试样的横截面尺寸和受热区域越不同则误差就越大,如果热扩散系数测试中的传热越接近于一维传热,则这种横截面尺寸所带来的误差就越小。

我们还注意到,对于相同的样品厚度  $L$ ,试样表面受热部分的横向尺寸  $\Delta y$  越大则热扩散系数测量误差就越小,随着  $\Delta y$  的增加而其它条件相等,二维传热性质在样品对称轴上的表现所产生的影响较小。

同时从图 4-3 中还可以看出,热扩散系数测试中被测样品有一个最佳厚度,在其它测试条件不变情况下,这个最佳厚度可以保证测量的系统误差最小。因此,如果能使得热扩散系数测量误差绝对值小于 1%,可以使得测试系统误差降到最低。

## 5. 结论

针对目前典型的商品化闪光法测试设备中样品安装方式、样品表面截面积与闪光加热光斑面积的比例关系,假设样品处于绝热环境条件下,通过数值分析技术对闪光法三维传热模型进行了计算分析,认为需要对样品尺寸进行严格限制,样品尺寸的限制主要从以下三个方面考虑:

(1) 样品受热面(样品的前表面)面积不得超过加热光斑面积,尽可能使得样品前表面面积与加热光斑面积相等。

(2) 如果样品前表面面积等于加热光斑面积,则测试模型是一个典型一维瞬态热传递模型,测试误差会随着样品厚度的增加而减小。

(3) 如果样品前表面面积大于加热光斑面积,则测试模型是一个二维瞬态热传递模型,样品厚度有一个最佳值使得测试误差最小,其他样品厚度都会使得测试误差变大。

综上所述,采用闪光法测试导热材料的热性能过程中,为了保证最小测量误差和确定不同材料热性能的测试流程,可以制作一系列不同厚度的样品,并采用相同的试验参数进行测量,通过测试结果可以做出如下判断:

(1) 样品测试是一维模型还是二维模型,如果是一维模型,测量结果会在一定厚度后保持不变;如果是二维模型,测量结果有一个最大值。

(2) 如果是二维模型,可以判断出样品最佳厚度数值。

综上所述,采用闪光法进行材料热性能测试并不是一个简单的测试过程,需要各种试验参数(闪光脉冲能量、闪光脉冲宽度、样品前表面面积与加热光斑面积之比、被测材料导热系数、样品厚度等)完美配合才能得到准确的测量结果。特别是对于未知材料的热性能测试,需要进行一系列的考核验证测试才能确定测量结果的准确性。

通常采用闪光法测试过程中,各个测试结构中的闪光法测试设备都有各自的闪光加热参数、样品支架和安装方式,采用同样样品在进行闪光法对比测试中常常会出现明显的测试误差,通过以上分析就说明了这些误差的原因。因此在闪光法对比测试中要对试验参数进行整体设计和考虑才能得到正确的结果。