

稳态保护热板法热导率测试技术应用——Application Note: 005

## 护热板法导热系数测定仪 加热板加热方式的有限元分析和优化设计



摘要：针对保护热板法热导率测试中的加热板加热方式，采用有限元动态热分析技术模拟计算了加热板加热方式和过程对保护热板法热导率测试中温度恒温时间的影响，由此提出了相应的加热方式优化方案，从而为保护热板法热导率的测试效率提高提供指导。

## 1. 前言

在护热板法热导率测试过程中，根据测试温度的要求，一般是依照经验给中心加热板施加一定功率的直流加热电流并保持恒定不变。在此加热电流使得中心加热板温度上升过程中，护热加热器会跟踪中心加热板的温度变化，当达到稳态条件时，中心加热板和护热加热器基本都能达到设定温度的范围。达到稳态条件后的恒定温度尽管基本上不会是整数值（如整 10℃或整 100℃的倍数），但这并不影响测量精度，只是测量结果数据的美观性差些。

这种从一开始就输入恒定电功率的方法称之为恒功率加热法，它的特点是操作步骤简单且容易操控，而且加热功率的稳定性和精度高。针对某一特定的护热板法热导率测试设备，只要摸索出一系列不同测试温度时的直流电功率，就可以比较容易的实现不同对应温度下的热导率测试，因此目前绝大多数护热板法热导率测量装置基本上都采用这种加热方法。但这种加热方式的缺点是耗时很长，这也是稳态法测量热导率的主要特点之一。

本研究就是通过有限元热分析计算，设计另外一种分段式加热方式，即把整个加热过程分为两部分，第一部分采用较大加热功率，第二部分采用较小加热功率，由此设法缩短加热板的热平衡时间，提高测试效率。

## 2. 有限元模型相关参数

整个测试模型是圆形结构，为了提高分析计算效率，将测试模型简化为如图 2-1 所示的四分之一圆结构。测试模型中相关部件的参数设定如下：

### (1) 被测试样相关参数

试样尺寸： $\phi 100\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。试样的横截面积： $0.05 \times 0.05 \times \pi = 7.854 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 。试样材质：PC 高粘度。热导率： $0.189 \text{W/mK}$ 。密度： $1190 \text{kg/m}^3$ 。比热： $1535 \text{J/kgK}$ 。

### (2) 加热板板相关参数

尺寸： $\phi 100\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。材质：红铜。热导率： $390 \text{W/mK}$ 。密度： $8900 \text{kg/m}^3$ 。比热： $390 \text{J/kgK}$ 。

### (3) 冷板相关参数

冷板尺寸： $\phi 100\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。冷板材质：AISI 304 不锈钢。热导率： $16 \text{W/mK}$ 。密度： $8000 \text{kg/m}^3$ 。比热： $500 \text{J/kgK}$ 。

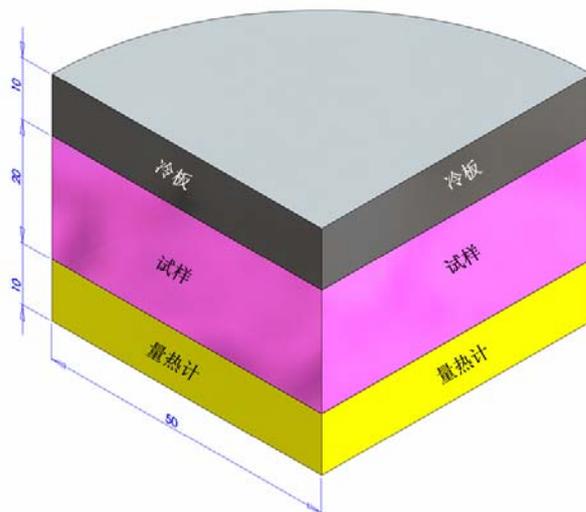


图 2-1 稳态护热板法热分析模型

以上热板热物性数据都是 20℃ 时的数据，并认为在不大的温度范围内这些参数不发生变化。

在以上测试模型中，设定冷板的温度为 25℃，施加给加热板的加热功率希望能使加热板达到 45℃。那么根据稳态热导率计算公式可以得到热量为：

$$Q = \frac{\lambda A (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} = \frac{0.189 \times 7.854 \times 10^{-3} \times (45 - 25)}{0.02} = 1.4844 \text{W}$$

那么对应于四分之一分析模型时，加热板的热功率应为上述热量的四分之一，即 0.3711W。

对于低热导率材料，加热热量应为：

$$Q = \frac{\lambda A (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} = \frac{0.03 \times 7.854 \times 10^{-3} \times (45 - 25)}{0.02} = 0.23562 \text{W}$$

那么对应于四分之一分析模型时，加热板的热功率应为上述热量的四分之一，即 0.058905W。

### 3. 有限元模拟计算和分析

#### 3.1. 恒定加热功率时的热稳定过程分析

根据以上测试分析模型，采用有限元瞬态热分析方法进行计算。

计算参数为：冷板温度恒定为  $25^{\circ}\text{C}$ ，试样和加热板的初始温度为  $25^{\circ}\text{C}$ ，整个热过程时间为 72000 秒，计算步长为 1200 秒。从 1~72000 秒内始终施加在加热板上的热量为  $0.3711\text{W}$ 。

经过计算，得到在恒定加热功率时加热板的温度变化曲线，如图 3-1 所示。此曲线也相当于试样热面温度的变化曲线。

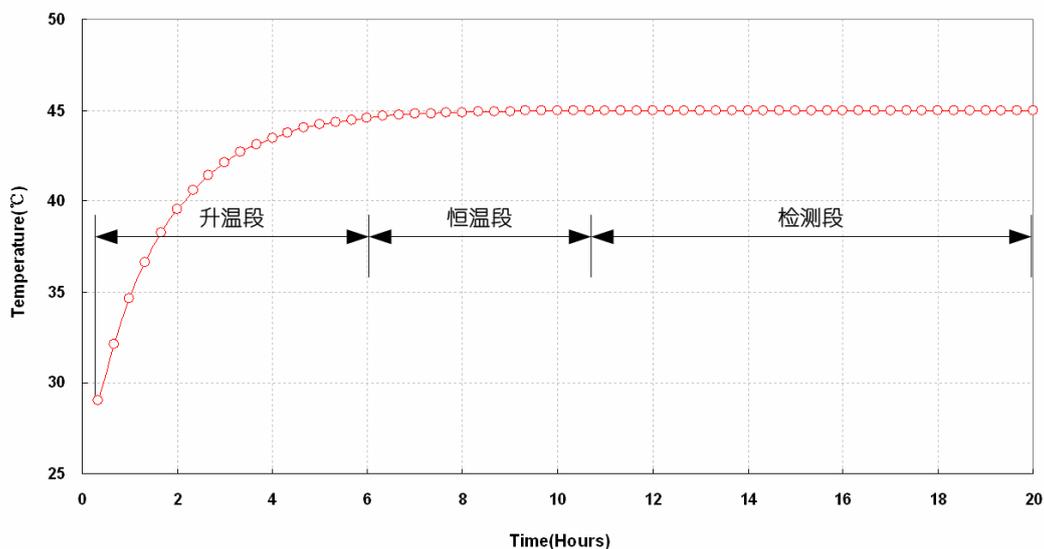


图 3-1 中心加热板温度平衡过程示意图

在稳态护热板法热导率测试过程中，要求输入加热功率和相应部件的温度都达到一个平衡状态。从图 3-1 模拟计算获得的温升曲线可以看出，这个平衡过程可以分为升温、恒温和检测三个阶段。

在稳态护热板法国际标准 ISO / DIS 8302 中规定热平衡判别的标准为：输入功率的随机波动、变动引起的热板表面温度波动或变动，应小于热板和冷板间温差的  $\pm 0.3\%$ 。对于与上述算例的  $20^{\circ}\text{C}$  温差，温度达到平衡时的波动应小于  $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$ 。在稳态护热板法标准 ASTM C177 中，达到平衡的标准是波动应小于温差的  $\pm 0.1\%$ ，对于与上述算例的  $20^{\circ}\text{C}$  温差，温度达到平衡时的波动应小于  $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 。以上两个标准还同时规定至少要在 1 小时内的温度波动不能超过  $\pm 0.3\%$  和  $\pm 0.1\%$ 。在实际测量中，1 小时的恒温检测是最短的时限，对于很多低导热材料的测试，这个时间间隔将更长。

按照上述两个标准规定的热平衡判据分别对图 3-1 模拟计算结果进行分析，图 3-1 中升温过程最早达到热平衡点的时间是开始加热试验的 9 小时和 11 小时后，即升温段时间将近需要 8 小时以上。如果按照检测端为 1 小时来做判断的话，总的测试时间将近 10 小时和 12 小时。由此可见，升温段占用了测试时间的绝大部分。

通过对以上分析计算结果和相应的标准方法规定分析可以看出，如果想要缩短整个测试过程，不太可能去缩短必须的恒温段和检测段的时间，只有设法缩短升温段的时间。

#### 3.2. 分段加热方式时的热稳定过程分析

为了缩短升温段所用的时间，最有效的方法是设法让加热板（包括护热板）以最快的速度达到设定的热面温度，即使得恒温段时间提前。为此，通过有限元模拟计算来判断缩短时间的效率。

计算参数为：冷板温度还恒定为  $25^{\circ}\text{C}$ ，试样和加热板的初始温度还为  $25^{\circ}\text{C}$ ，整个热过程时间为 43200 秒（12 小时），计算步长为 600 秒。在 1~5000 秒范围内施加在加热板上的功率为 1.5、1.6、1.68 和 1.8 倍的  $0.3711\text{W}$ ，5000 秒后施加在加热板上的热量为  $0.3711\text{W}$ 。

经过计算，得到分段加热时 5000 秒前不同加热功率时加热板的温度变化曲线，如图 3-2 所示。其中图 3-3 为局部放大后的温度变化曲线，可以更清晰的看出不同加热功率时的温度恒定过程。从此计算结果可以明显的看出当在前 5000 秒时选用  $1.618 \times 0.3711\text{W}$  加热功率，加热板基本可以在 1.5 和 2.5 小时时开始

进入温度恒定阶段，温升时间可以缩短 6 倍。

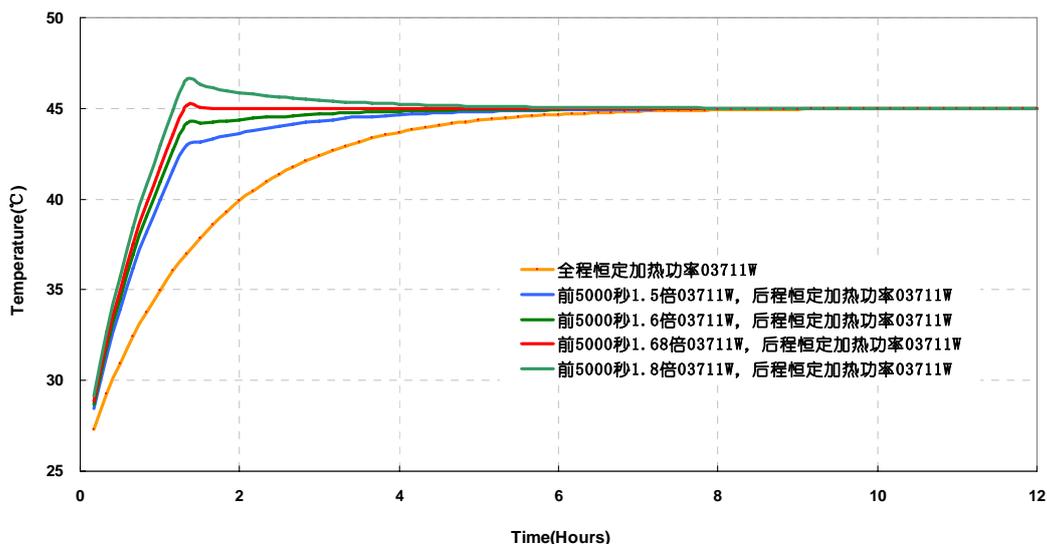


图 3-2 试样热导率为  $0.189\text{ W/mK}$  不同分段加工功率时中心加热板温度平衡过程示意图

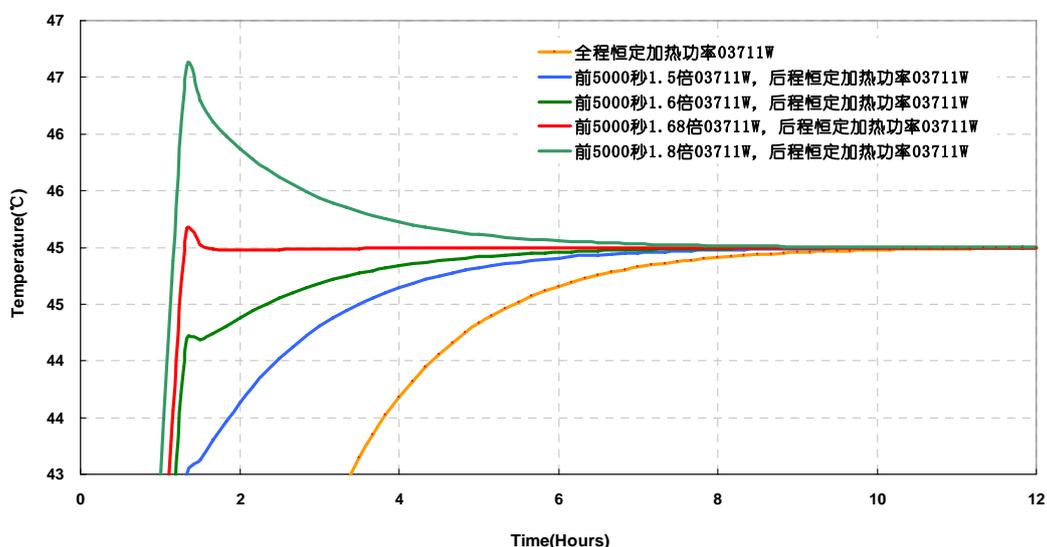


图 3-3 放大示意图

### 3.3. 结论

从以上分析结果可以很容易的对稳态护热板法热导率测试的加热方式进行设计，并在不影响测量精度的前提下可以大大缩短测试时间。具体的加热方法是：

(1) 硬件准备：配备两套直流恒流源作为加热电源给主加热板提供电加热功率，配备带 PID 功能的温度控制器和移相式直流固态继电器做为控制加热板加热电流的执行机构，配备数控开关实现在两套恒流源之间进行切换。同时，还需配备数据采集装置来监控和采集实际施加在加热板上的加热功率（电流和电压）。

(2) 在进行试验测试时，首先设定好加热板温度（即试样热面温度），然后开启一套直流恒流源并设置一个较大的电流输出值，然后开启 PID 温度控制器来控制加热电流对加热板的加热。设置较大加热电流输出值的目的是为了能尽快的使得加热板温度达到设定温度点。在对加热板加热过程中同时需要开启护热板的加热电源，使得护热板温度跟踪加热板的温度变化。

(3) 在加热板升温加热过程中，监控和采集加热功率。当加热板温度达到设定点温度后（以控温仪控制精度为准），对加热功率进行近半小时的连续检测并进行分析。当加热功率达到稳定时，说明加热板温度达到了恒温阶段（以控温仪测温精度为准）。

(4) 通过检测和分析判断加热板基本达到设定温度后，通过软件设置第二套恒流源的功率输出值，此套恒流源的功率输出值就是上述检测到的功率值。然后启动切换开关将第一套恒流源加热回路切换到第二套恒流源上，使得第二套恒流源的输出电流施加到加热板上。

(5) 恒流源切换完成后，监测施加在加热板上的加热功率和温度值，并按照标准方法规定的温度波动来判断是否达到稳定状态。达到稳定后，开始进行测量和数据分析。

总之，以上缩短测试时间方法的核心是把一个漫长的恒定功率加热方式转换为一个热惰性较大对象的快速控温问题。只要选择好适合于热惰性温度控制的 PID 参数，就可以很容易的缩短测试时间。当然，针对不同厚度和不同热导率的被测试样，也就是针对不同热阻试样，最好确定出一系列相应的 PID 参数，这样的效果更佳。