

准稳态法热物性测试技术应用——Application Note: 005

## 量热计式准稳态法热导率测试 原理模型的改进和分析



摘要：对 ASTM E2584 中规定的测试模型进行改进，推导出了更准确的热导率测试计算公式，以解决在升温初期热导率测量结果误差大的问题。同时，选择了以 Modelica 语言为基础的 SimulationX 建模仿真软件对量热计式准稳态法热导率测试进行建模和仿真计算，大大提高了动态仿真计算的速度和精度，同时验证了改进后的量热计式准稳态法热导率模型和计算公式的正确性和有效性。

## 1. 简介

通过前期对量热计式准稳态法热导率测试技术的研究，遇到了两个比较突出的问题：

(1) 尽管前期研究已经确认了采用单试样结构在量热计式准稳态法热导率测试中的首选方式，并通过有限元分析验证了在升温速度足够慢的前提下可以仅通过一次升温过程就可以获得整个温升区间内热导率随温度变化曲线。但这种模式存在的问题是在升温的初始阶段，即在较低的温度区间内，得到的热导率误差略大。尽管通过降温过程可以获得较高精度的热导率来进行弥补，但降温过程中的测试效率非常低。

(2) 准稳态法测试技术是一种随时间变化的动态测试技术，在用有限元模拟仿真计算中往往需要大量的计算机时，还不一定能获得满意的计算精度。

因此，本文将针对以上量热计式准稳态法测试中存在的问题，试图进一步对量热计式准稳态法测试理论模型做一定的修改，以提高升温前期的热导率测量精度。同时，选择新的建模仿真软件对量热计式准稳态法原理模型进行快速精密的仿真计算，以快速和准确的得到满意的模拟计算结果。

## 2. 量热计式准稳态法热导率测试原理模型的改进

量热计式准稳态法热导率测试有多种试样结构形式，如圆棒状、矩形状和正方形状等，在实际应用中涉及最多的则是正方形状结构。因此，按照 ASTM E2584 中的规定，量热计式准稳态法热导率测试原理模型如图 2-1 所示。

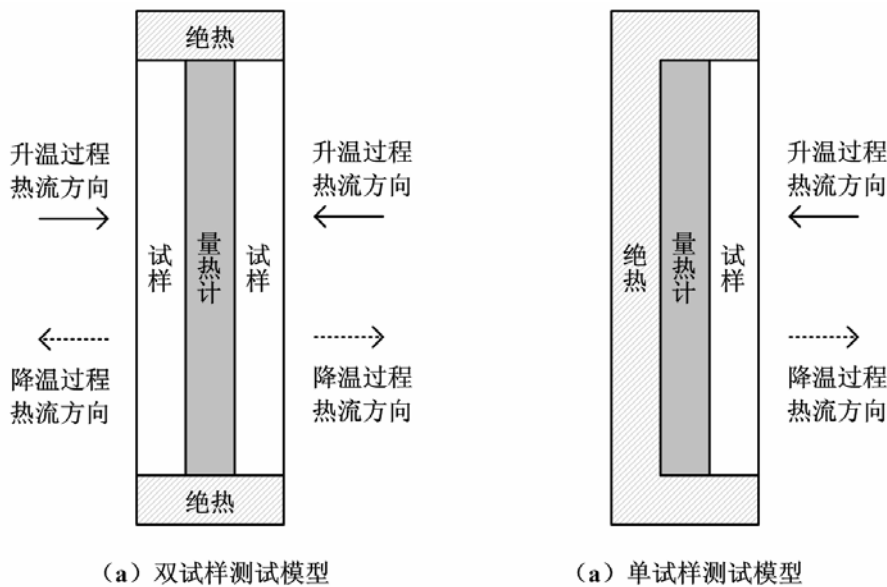


图 2-1 ASTM E2584 中的规定的两种量热计式准稳态法热导率测试模型

原理模型中包含了双试样和单试样两种正方形结构形式，对应着以下两个相应的等效热导率测量计算公式：

$$\lambda_s = \frac{F_f l_s [l_c \rho_c C_p^c + l_s \rho_s C_p^s]}{2\Delta T} \quad (\text{双试样}) \quad (2.1.1)$$

$$\lambda_s = \frac{F_f l_s [l_c \rho_c C_p^c + \frac{1}{2} l_s \rho_s C_p^s]}{\Delta T} \quad (\text{单试样}) \quad (2.1.2)$$

式中： $\lambda_s$  表示试样整个厚度方向上的等效热导率 ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )， $\rho_s$  表示试样密度 ( $kg \cdot m^{-3}$ )， $C_p^s$  表示试样比热容 ( $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ )， $l_s$  表示单个试样的厚度 ( $m$ )， $\rho_c$  表示量热计密度 ( $kg \cdot m^{-3}$ )， $C_p^c$  表示量热计比热容 ( $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ )， $l_c$  表示量热计厚度 ( $m$ )， $F_f$  表示量热计的温度变化速率 ( $K/s$ )， $\Delta T$  表示试样厚度方向上两个端面之间的温差 ( $^{\circ}C$ )。

由此，对于任意一种形式的测量模型，如果已知量热计和被测试样的尺寸、质量和比热容随温度变化情况，就可以通过测量被测试样两个端面的温差和量热计的温度变化速率，由公式(2.1.1)和(2.1.2)就可以计算出被测试样随平均温度变化的等效热导率。

## 2.1. 双试样准稳态法测试模型的改进

在使用公式(2.1.1)和(2.1.2)进行测试时，量热计在某一时刻的温度变化速度  $F_f(t)$  一般用  $\Delta T_c(t)/\Delta t$  来表示，这显然认为量热计温度随时间的变化  $T_c(t)$  近似为一个二次多项式，即  $T_s(z,t) \cong T_c(t) + a(t)z + b(t)z^2$ ，量热计的温度变化速度就相当于对这个二次多项式进行求导。

为了更加准确的描述试样内的温度变化，对于试样温度随时间的变化可以用三次多项式来描述，以替代采用二次多项式来近似表达试样内 ( $0 < z < l$ ) 的一维温度分布  $T(z,t)$ ，即：

$$T_s(z,t) \cong T_c(t) + a(t)z + b(t)z^2 + c(t)z^3 \quad (2.1.3)$$

上式中的三个未知参量  $a(t)$ 、 $b(t)$  和  $c(t)$  可以通过以下准稳态法测量模型的三个方程获得。

双试样测试模型中，坐标原点为量热计中心点，坐标  $z$  在量热计的厚度方向。量热计热导率偏微分方程以及试样两个表面的边界条件方程，即：

$$\text{偏微分方程:} \quad \lambda_s \times \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} = C_p^s \rho_s \times \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (2.1.4)$$

$$\text{边界条件在 } z=0: \quad \frac{C_p^c \rho_c l_c}{2} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \lambda_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (2.1.5)$$

$$\text{边界条件在 } z=l: \quad T_s(0,t) = F_f t \quad (2.1.6)$$

对微分方程(2.1.3)求  $z$  的导数，得  $\partial T_s / \partial z_{z=0} = a(t)$ ，把此结果代入方程(2.1.5)中，得到有关  $a(t)$  的方程，即：

$$a(t) = \frac{C_p^c \rho_c l_c}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t}$$

对微分方程(2.1.3)求  $z$  的导数 (两次)，得  $\partial^2 T_s / \partial z^2_{z=0} = 2b(t)$ ；对微分方程(2.1.3)求  $t$  的导数 (一次)，得  $\partial T_s(z,t) / \partial t_{z=0} = \partial T_c / \partial t$ ，把此结果代入方程(2.1.4)中 ( $z=0$ )，得到有关  $b(t)$  的方程：

$$\lambda_s \times 2b(t) = C_p^s \rho_s \times \frac{\partial T_c}{\partial t}; \quad b(t) = \frac{C_p^s \rho_s}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t}$$

对微分方程(2.1.3)求  $z$  的导数 (两次)，得  $\partial^2 T / \partial z^2_{z=l} = 2b(t) + 6l \times c(t)$ ；对方程(2.1.6)求  $t$  的导数 (一次)，得  $\partial T_s(z,t) / \partial t_{z=l} = F_f$ ，把此结果代入方程(2.1.4)中 ( $z=l$ )，得到有关  $c(t)$  的方程，即：

$$\lambda_s \times (2b(t) + 6l \times c(t)) = C_p^s \rho_s \times F_f \quad \lambda_s \times \left( 2 \times \frac{C_p^s \rho_s}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t} + 6l \times c(t) \right) = C_p^s \rho_s \times F_f$$

$$c(t) = \frac{C_p^s \rho_s F_f - 2\lambda_s \times \frac{C_p^s \rho_s}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t}}{6l\lambda_s} = \frac{F_f - \frac{\partial T_c}{\partial t}}{6\lambda_s l_s} \times C_p^s \rho_s$$

量热计温度随时间的变化  $T_c(t)$  用一温度传感器进行采集，把  $a(t)$ 、 $b(t)$  和  $c(t)$  代入方程(2.1.3)中，并用  $z=l$  来进行评价将会得到一个更加准确的有效热导率表达式，即：

$$\begin{aligned}
T_s(z,t) &\cong T_c(t) + \frac{C_p^c \rho_c l_c}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t} \times l_s + \frac{C_p^s \rho_s}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t} \times l_s^2 + \frac{F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t}}{6\lambda_s l_s} \times C_p^s \rho_s \times l_s^3 \\
&= T_c(t) + \frac{(C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s)}{2\lambda_s} \times l_s \times \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{2\lambda_s} \times \left( \frac{F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t}}{3} \right) \times l_s \\
&= T_c(t) + \frac{l_s}{2\lambda_s} \left[ (C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s) \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{3} \left( F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) \right] \tag{2.1.7}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta T = T_s(z,t) - T_c(t) &= \frac{(C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s)}{2\lambda_s} \times l_s \times \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{2\lambda_s} \times \left( \frac{F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t}}{3} \right) \times l_s \\
\lambda_s &= \frac{l_s}{2} \frac{\left[ (C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s) \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{3} \left( F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) \right]}{\Delta T} \\
\lambda &= \frac{l_s}{2} \frac{\left[ (C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s) \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{3} \left( F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) \right]}{\Delta T} \tag{2.1.8}
\end{aligned}$$

从上式中可以看出，第一项是方程(2.1.1)中旧的有效热导率表达项，在前期的热传导过程中解析精度较差。加上新的修正后会改善量热计法的精度，特别是在时间段的初期量热计温度变化速度  $\partial T_c / \partial t$  与试样表面温度变化速率  $F_s$  相比较小时，精度的改善将更加明显。这是因为修正过程中更加准确的考虑到了试样热吸收的影响。方程(2.1.8)和方程(2.1.1)都包含了试样材料在整个测量温度范围内的比热容  $C_p^s \rho_s$ ，因此在计算有效热导率时要预先知道试样的比热容。

## 2.2. 单试样准稳态法测试模型的改进

单试样测试模型中，坐标原点为量热计底部中心点，坐标  $z$  在量热计的厚度方向。量热计热导率偏微分方程以及试样两个表面的边界条件方程，即：

$$\text{偏微分方程:} \quad \lambda_s \times \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} = C_p^s \rho_s \times \frac{\partial T_s}{\partial t} \tag{2.1.9}$$

$$\text{边界条件在 } z=0: \quad C_p^c \rho_c l_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \lambda_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=0} \tag{2.1.10}$$

$$\text{边界条件在 } z=l: \quad T_s(0,t) = F_f t \tag{2.1.11}$$

对微分方程(2.1.3)求  $z$  的导数，得  $\partial T_s / \partial z_{z=0} = a(t)$ ，把此结果代入方程(2.1.9)中，得到有关  $a(t)$  的方程，即：

$$a(t) = \frac{C_p^c \rho_c l_c}{\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t}$$

对微分方程(2.1.3)求  $z$  的导数（两次），得  $\partial^2 T_s / \partial z^2_{z=0} = 2b(t)$ ；对微分方程(2.1.3)求  $t$  的导数（一次），得  $\partial T_s(z,t) / \partial t_{z=0} = \partial T_c / \partial t$ ，把此结果代入方程(2.1.9)中（ $z=0$ ），得到有关  $b(t)$  的方程：

$$\lambda_s \times 2b(t) = C_p^s \rho_s \times \frac{\partial T_c}{\partial t}; \quad b(t) = \frac{C_p^s \rho_s}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t}$$

对微分方程(2.1.3)求  $z$  的导数（两次），得  $\partial^2 T / \partial z^2_{z=l} = 2b(t) + 6l \times c(t)$ ；对方程(2.1.11)求  $t$  的导数（一次），得  $\partial T_s(z,t) / \partial t_{z=l} = F_f$ ，把此结果代入方程(2.1.9)中（ $z=l$ ），得到有关  $c(t)$  的方程，即：

$$\lambda_s \times (2b(t) + 6l \times c(t)) = C_p^s \rho_s \times F_s \quad \lambda_s \times \left( 2 \times \frac{C_p^s \rho_s}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t} + 6l \times c(t) \right) = C_p^s \rho_s \times F_s$$

$$c(t) = \frac{C_p^s \rho_s F_s - 2\lambda_s \times \frac{C_p^s \rho_s}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t}}{6l\lambda_s} = \frac{F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t}}{6\lambda_s l} \times C_p^s \rho_s$$

量热计温度随时间的变化  $T_c(t)$  用一温度传感器进行采集, 把  $a(t)$ 、 $b(t)$  和  $c(t)$  代入方程(2.1.3)中, 并用  $z=l$  来进行评价将会得到一个更加准确的有效热导率表达式, 即:

$$T_s(z, t) \cong T_c(t) + \frac{C_p^c \rho_c l_c}{\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t} \times l_s + \frac{C_p^s \rho_s}{2\lambda_s} \frac{\partial T_c}{\partial t} \times l_s^2 + \frac{F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t}}{6\lambda_s l} \times C_p^s \rho_s \times l_s^3$$

$$= T_c(t) + \frac{(2 \times C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s)}{2\lambda_s} \times l_s \times \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{2\lambda_s} \times \left( \frac{F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t}}{3} \right) \times l_s$$

$$= T_c(t) + \frac{l_s}{2\lambda_s} \left[ (2 \times C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s) \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{3} \times \left( F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) \right] \quad (2.1.12)$$

$$\Delta T = \frac{(2C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s)}{2\lambda_s} \times l_s \times \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{2\lambda_s} \times \left( \frac{F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t}}{3} \right) \times l_s$$

$$\lambda_s = \frac{l_s}{2} \frac{\left[ (2C_p^c \rho_c l_c + C_p^s \rho_s l_s) \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{3} \left( F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) \right]}{\Delta T}$$

$$\lambda_s = l_s \frac{\left[ \left( C_p^c \rho_c l_c + \frac{1}{2} C_p^s \rho_s l_s \right) \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{C_p^s \rho_s l_s}{6} \left( F_s - \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) \right]}{\Delta T} \quad (2.1.13)$$

从上式中可以看出, 第一项是方程(2.1.2)中旧的有效热导率表达项, 在前期的热传导过程中解析精度较差。加上新的修正后会改善量热计法的精度, 特别是在时间段的初期量热计温度变化速度  $\partial T_c / \partial t$  与  $F$  相比较小时, 精度的改善将更加明显。这是因为修正过程中更加准确的考虑到了试样热吸收的影响。方程(2.1.13)和方程(2.1.2)都包含了试样材料在整个测量温度范围内的比热容  $C_p^s \rho_s$ , 因此在测量有效热导率时要预先知道试样的比热容。

### 3. 采用 Modelica 平台软件进行准稳态法测试原理建模和仿真

通过以往的有限元建模和模拟仿真计算分析, 尽管我们得到了很多有用的计算结果和结论, 但在采用有限元法进行分析过程中遇到了很多实际问题, 最突出的问题是在模拟计算随时间变化的动态分析计算中, 有限元分析过程中需要对每个时间步骤内进行重复多网格计算, 在纯热传导计算中, 总共 100 步的动态计算基本需要半个小时左右, 而对于更精细时间分析计算则基本上不太可能, 特别是对于辐射形式的动态热传递模拟计算也基本不太可能。因此, 对于随时间变化的模型建立和仿真迫切需要更有效的分析软件。

基于以上模拟仿真计算中遇到的问题, 我们选择了以 Modelica 语言为基础商用软件作为分析软件, 这主要是因为以 Modelica 语言为基础的建模仿真软件在动态计算中的速度要远远快于有限元方式的模拟计算, 同时还可以很方便的建立多个物理场耦合(如电热、电热力)的测试模型并进行分析计算。

Modelica 是一种开放、面向对象的以方程为基础的语言, 可以跨越不同领域, 方便地实现复杂物理系统的建模, 包括: 机械、电子、电力、液压、热、控制及面向过程的子系统模型。特别是 Modelica 库包含了大量的模型, 其中, 开放的 Modelica 标准库包括了不同物理领域的 920 个元件模型, 具有 620 种功能, 基本能完全覆盖热物理性能测试方法建模和仿真中对电、热、力和流体等模型的需要。

Modelica 是一个开放的物理建模平台, 很多商业软件都推出了相应的建模和分析软件和模块, 如

SimulationX、MapleSim 和 Matlab 中的 Simscape。在热物理性能测试模型建立和仿真计算中使用以 Modelica 语言为基础的分析软件无需将设计转换为数学方程然后用信号流方块图表示，仅需要在屏幕上简单地使用代表物理模型的建模元件重建系统框图，这些模型框图直接反映了实际物理系统或热物理性能测试系统。同时，简单和直观模型创建过程使得建模过程非常快速和便捷，而所建的模型框图与实际热物性测试系统示意图非常相似，可以很便捷的校验模型。

### 3.1. 以 Modelica 语言为基础的 SimulationX 仿真软件图形化建模

尽管按照 ASTM E2584 中的规定，量热计式准稳态法热导率测试可以采用双试样和单试样两种测试结构形式，但基于以往依阳公司对量热计式准稳态法热导率测量的模拟分析和计算，单试样结构形式往往更具有工程化实现的便利性。因此，本文将只针对单试样结构形式采用 Modelica 语言图形化技术建立模拟分析模型。

单试样结构量热计式准稳态法测试模型如图 3-1 所示，模型的尺寸基本按照常用的防隔热材料测试样的基本尺寸，如  $300 \times 300 \times 20 \text{mm}$  正方形板，由此来保证试样边长和厚度之比大于 10。量热计尺寸与试样尺寸相同，量热计的厚度也为  $20 \text{mm}$ ，量热计厚度选择不大是考虑到保证量热计整体的温度尽快的均匀。

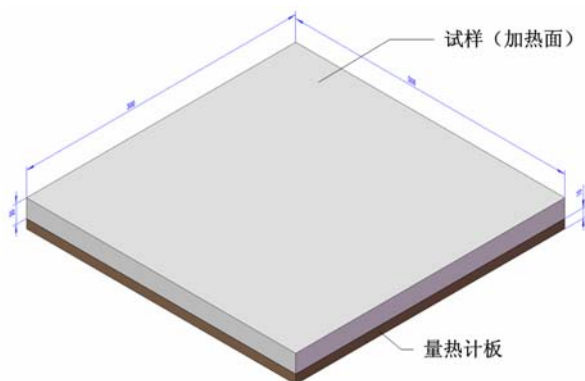


图 3-1 单试样结构量热计式准稳态法测试模型

采用以 Modelica 语言为基础的 SimulationX 仿真软件对图 3-1 所示的测试模型建立动态仿真模型，所建立的仿真分析模型如图 3-2 所示。

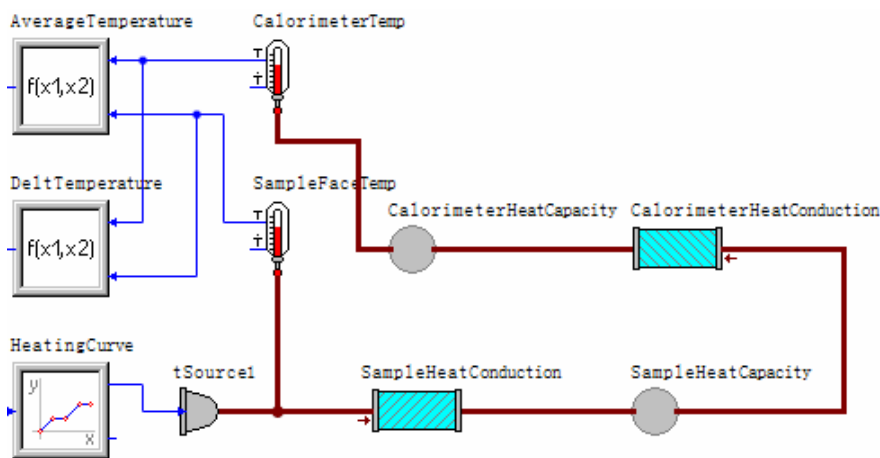


图 3-2 单试样结构量热计式准稳态法热导率测试 SimulationX 仿真模型

在图 3-2 所示的动态仿真模型中，所有模型的起始温度都为  $20^\circ\text{C}$ ，起始时间为 0 秒，结束时间为 117600 秒（32.7 小时），试样表面的升温速率为每分钟  $0.5^\circ\text{C}$ ，试样表面达到的最高温度为  $1000^\circ\text{C}$ 。

在图 3-2 所示的动态仿真模型中，最小时间间隔为 117 秒，最大时间间隔为  $(117600 - 0) / 1000 = 117.6$  秒，这样就设定计算分析的时间间隔为一固定值 117 秒，绝对和相对公差都设置为 0.01。

### 3.2. 模型参数设置

#### (1) 被测试样热物性参数设置

为了便于采用有限元进行模拟计算，根据准稳态法大多应用于热导率较低的防隔热类材料，设定了三种不同热导率范围的材料作为被测试样，这三种材料的热导率关系是倍数关系，即以如图 3-3 所示的超低热导率  $\lambda(T)$  材料为基准，其它两种材料的热导率分别是  $4\lambda(T)$  和  $40\lambda(T)$ ，由此来覆盖各种防隔热类材料的热导率变化范围 ( $0.005 \sim 0.6 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )。由于绝热材料比热容和密度随温度变化不大，所以模拟计算中都

采用一组比热容随温度变化数据，如图 3-3 所示，而密度则全部设定为常数，为  $300 \text{ kg/m}^3$ 。

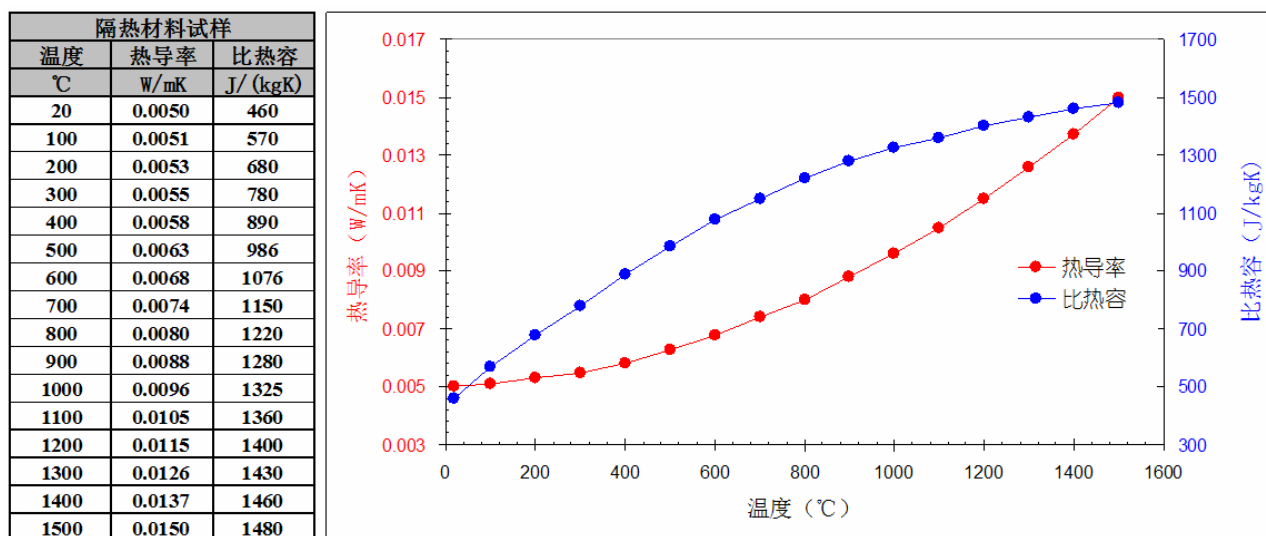


图 3-3 隔热材料试样热导率和比热容随温度变化数据

## (2) 量热计热物性参数设置

量热计材料采用金属类材料是出于几个方面的考虑，一是金属材料的热物性可以准确测量获得并有准确的文献数据，二是金属材料的密度和比热容相乘数据比较大，三是金属材料的高导热性有利于吸收热量后快速的达到温度均匀，减少量热计温度不均匀性对测量结果的影响。

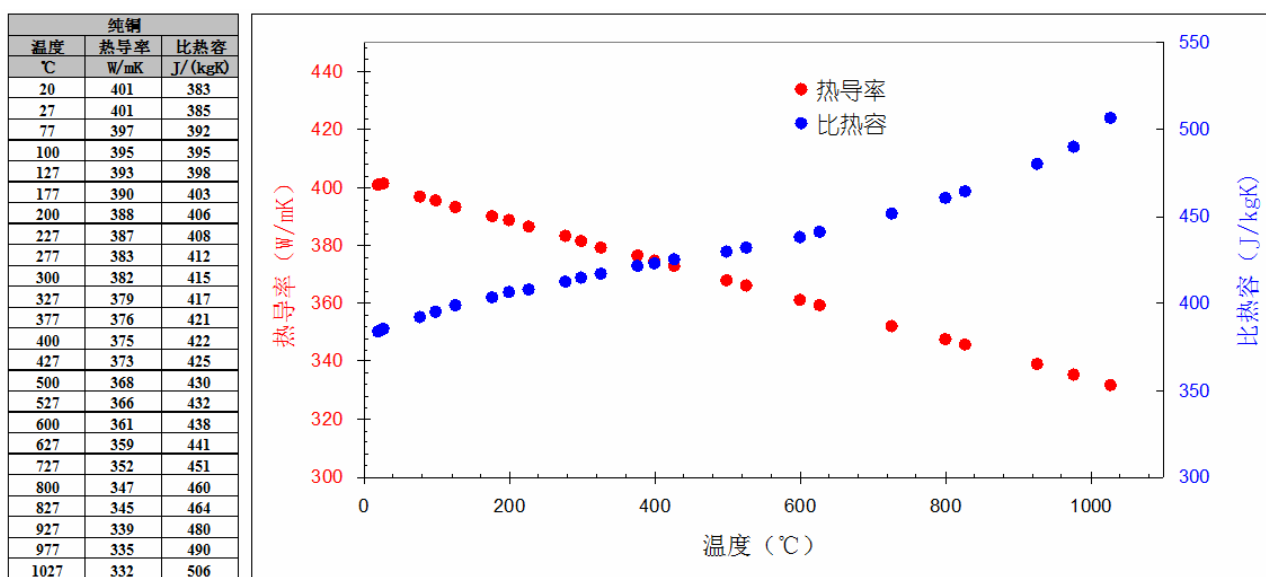


图 3-4 纯铜材料热导率和比热容随温度变化数据

这里选择了热导率很大的纯铜材料作为量热计材料，这是因为纯铜的密度很大而且热导率很高。纯铜的热物性性能数据如图 3-4 所示。

## 4. 模拟分析计算

针对三种不同热导率范围的被测试样，采用 SimulationX 进行模拟分析计算，对比修正前和修正后的热导率测量结果，验证热导率计算公式改进后的效果。

### 4.1. 单试样中低导热材料升温过程中准稳态法模拟分析

按照图 3-2 所示的分析模型，分别设置被测试样的热导率和比热容随温度变化数据，设置量热计的热

导率和比热容随温度变化数据。设置中选择中低热导率被测试样进行有限元分析计算，中低热导率试样在 20~1500℃ 温度范围内的热导率变化区间为 0.02~0.06 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>。

设置完成后，运行图 3-2 所示的分析模型，得到试样的外表面温度变化、量热计温度变化、试样的平均温度和试样厚度方向上两端的温差曲线，如图 4-1 所示。

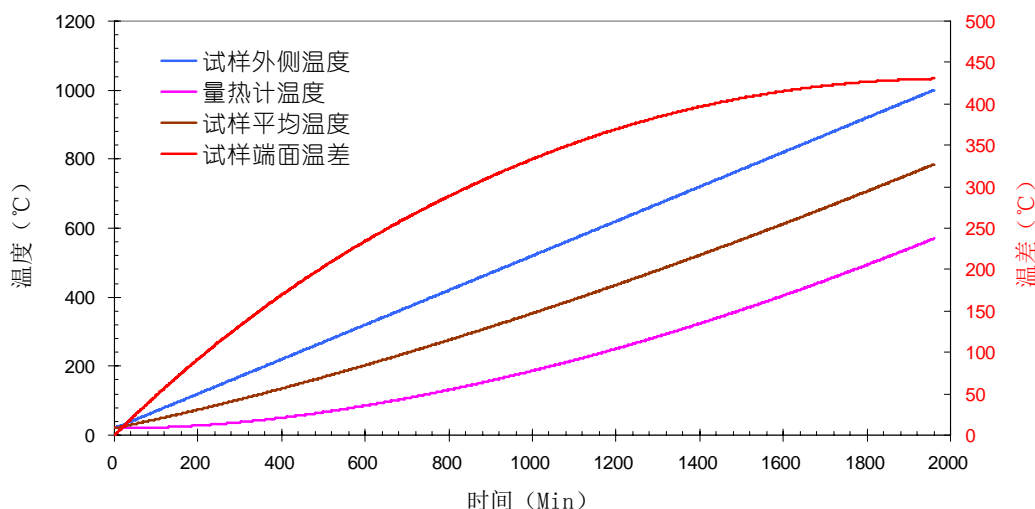


图 4-1 中低导热单试样结构升降温过程中各处温度和温差随时间变化曲线

从图 4-1 所示的模拟计算结果可以看出，在整个温度区间内的数据点约为 1006 个点，是以往有限元计算数据点数的 10 倍以上，这样可以更精密的进行计算和得到更精确的计算结果。根据图 4-1 中各种变温曲线、改进前公式(2.1.2)和改进后公式(2.1.13)得到不同处理方法的试样等效热导率，如图 4-2 所示。

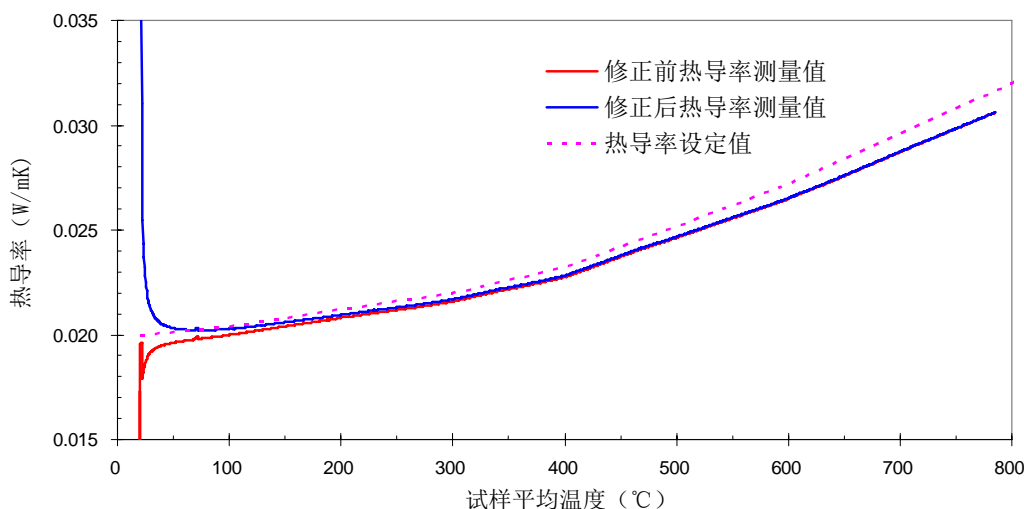


图 4-2 升温过程中计算公式改进前后的热导率测量值与设定值比较

升温过程中测量获得的改进前后的热导率值与设定值相比，将比较后的偏差百分比单独显示出来以更直观的表达热导率测量值偏差的大小和变化规律，如图 4-3 所示。在图 4-3 中还列出了采用有限元模拟分析时间间隔为 1176 秒共 100 个数据点时的热导率计算结果偏差百分比。

为更进一步的观察改进前后的效果，将图 4-3 中的温度坐标限制在 200℃ 以内，如图 4-4 所示，由此来观察热导率计算公式的改进在升温初期阶段的效果以及与有限元计算效果的对比。

从图 4-3 和图 4-4 所示的计算结果可以得出两个明显的结论：

(1) 采用有限元方法进行模拟计算时，在升温初期（前 200℃ 区间），由于数据计算点（相当于实际测试中的数据采集点）少，造成变温速率的计算误差较大，使得热导率测量值非常缓慢的接近热导率真值。而采用 SimulationX 进行计算时，采集点密度增大了 10 倍，使得热导率测量值较快的接近热导率真值。



(2) 改进后的偏差明显要比改正前更快速的接近设定值，特别是在升温的初期明显的减小了偏差值。

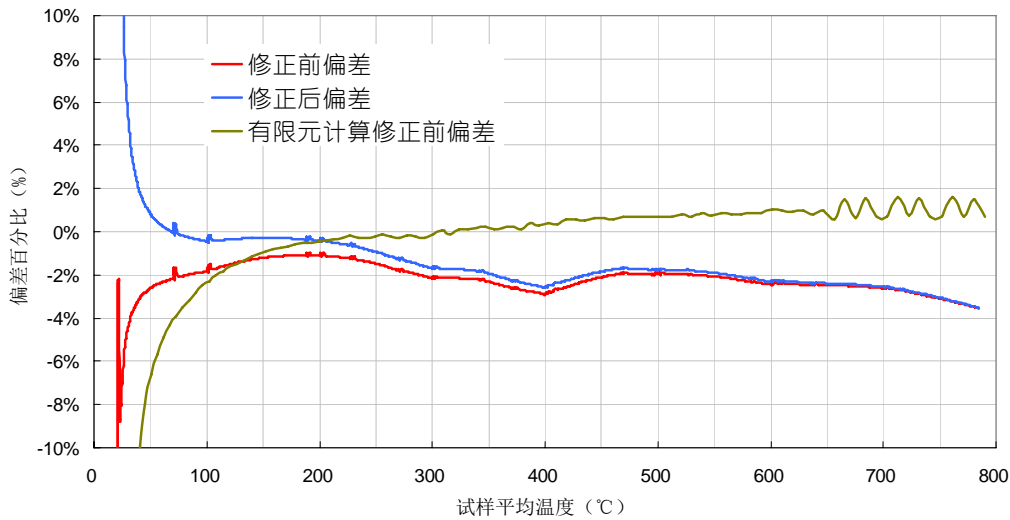


图 4-3 改正前后热导率测量值与设定值相比偏差百分比随温度的变化

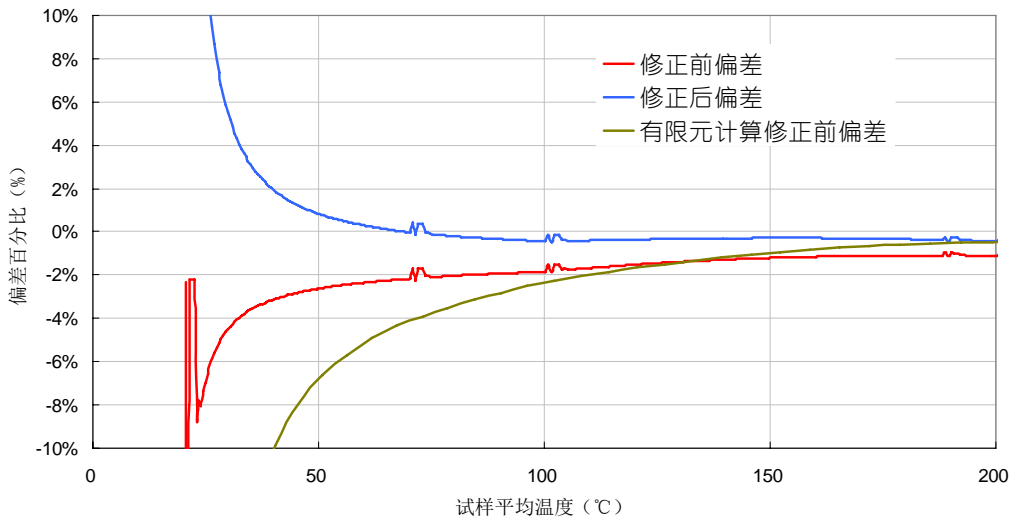


图 4-4 中低导热试样测试改进前后的效果比较

(3) 采用有限元方法进行模拟计算时，在进入准稳态升温状态后（200℃以后区间），数据计算点少所带来的结果是热导率计算结果的偏差反而很小，这可能是在准稳态区间可以采用较大时间区间内的升温速率来获得误差更小的测试结果，密集数据点来进行计算并不一定能获得较好的结果。

以上证明了这种改进后减小测量误差手段的有效性，但同时带来了一个问题，就是这种改进的基础是在已知试样两个端面的升温速率后，还需要已知试样的热容。因此，为了得到高精度的热导率测量结果，还是要设法测量出被测试样的比热容。

## 4.2. 单试样超低导热材料升温过程中准稳态法模拟分析

依然按照图 3-2 所示的 SimulationX 分析模型，分别设置被测试样的热导率和比热容随温度变化数据，设置量热计的热导率和比热容随温度变化数据。设置中选择超低热导率被测试样进行有限元分析计算，超低热导率试样在 20~1500℃ 温度范围内的热导率变化区间为  $0.005\text{-}0.015\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。

模拟计算中，从 20℃ 线性升温到 1000℃ 还是设置  $0.5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率升温。设置完成后，运行图 3-2 所示的分析模型，得到试样的外表面温度变化、量热计温度变化、试样的平均温度和试样厚度方向上两端的温差曲线，如图 4-5 所示。

根据图 4-5 中各种变温曲线、改进前公式(2.1.2)和改进后公式(2.1.13)得到不同处理方法的试样等效热

导率，如图 4-6 所示。

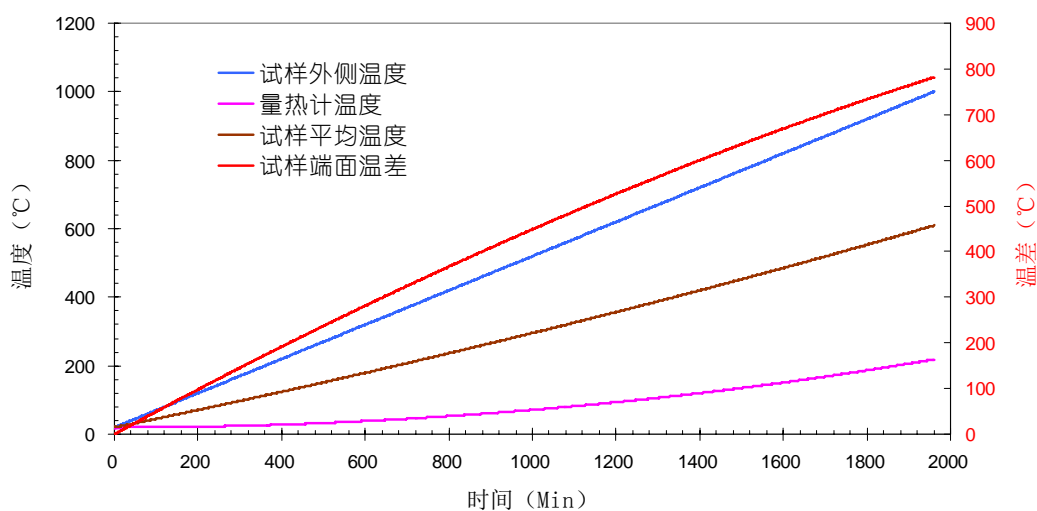


图 4-5 超低导热单试样结构 0.5°C/min 升温速率时各种温度随时间的变化曲线

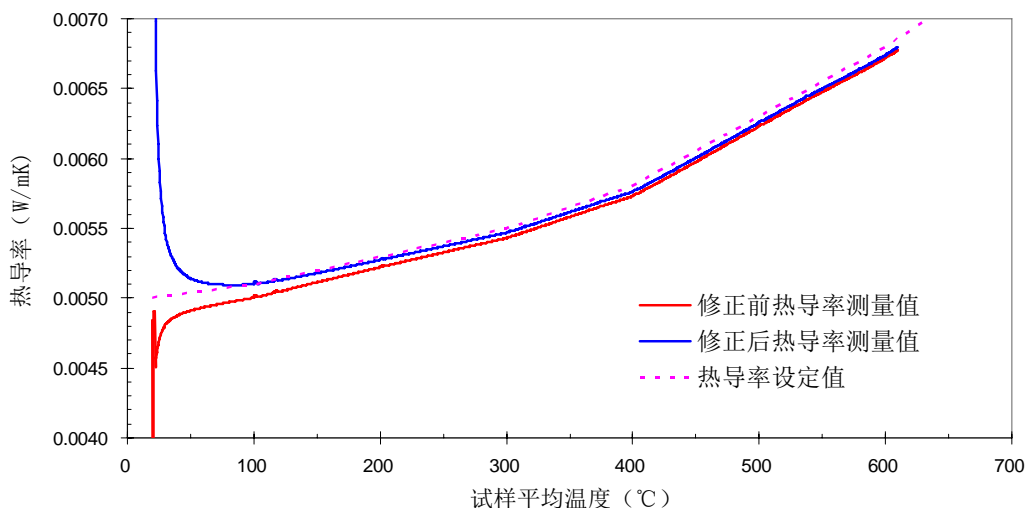


图 4-6 超低导热试样升温过程中计算公式改进前后的热导率测量值与设定值比较

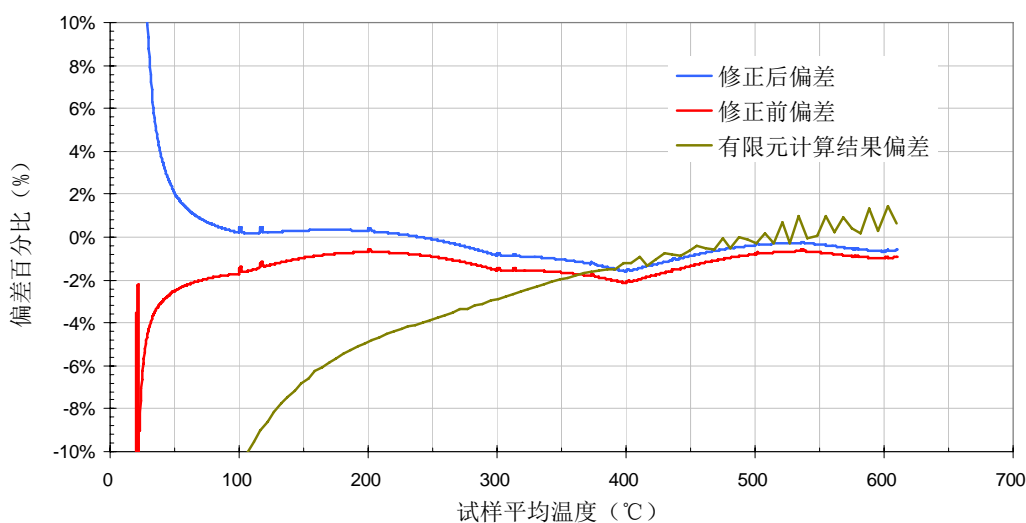


图 4-7 改正前后热导率测量值以及有限元计算结果与设定值相比偏差百分比随温度的变化

升温过程中测量获得的改进前后的热导率值与设定值相比，将比较后的偏差百分比单独显示出来以更直观的表达热导率测量值偏差的大小和变化规律，如图 4-7 所示。在图 4-7 中还列出了采用有限元模拟分析时间间隔为 1176 秒共 100 个数据点时的热导率计算结果偏差百分比。

为进一步的观察改进前后的效果，将图 4-7 中的温度坐标限制在 200℃ 以内，如图 4-8 所示，由此来观察热导率计算公式的改进在升温初期阶段的效果。

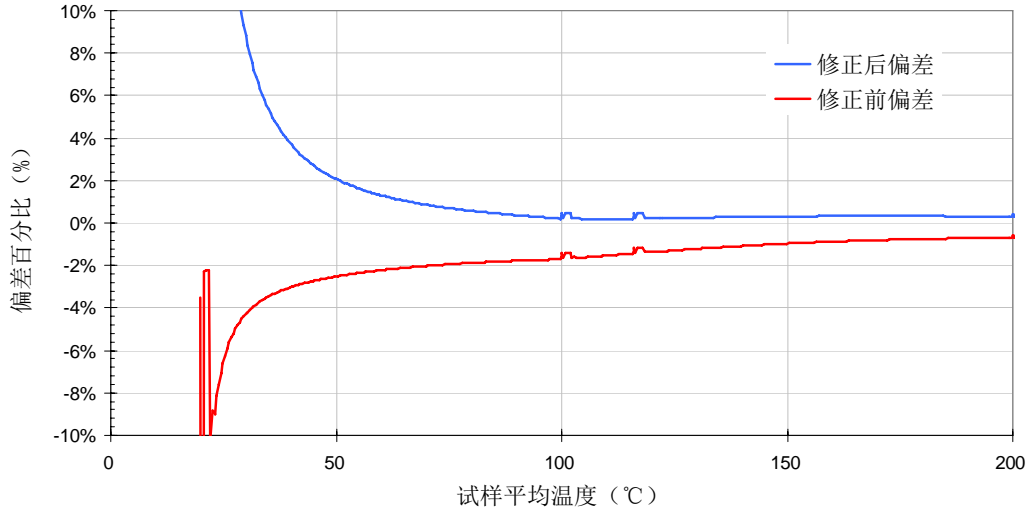


图 4-8 超低导热试样测试改进前后的效果比较

从图 4-7 和图 4-8 所示的计算结果也可以得出上述中低导热试样模拟计算中相同的结论，而减小数据采集间隔对于超低导热被测试样更有明显的效果。

将上述的升温速率从 0.5℃/min 提高到 1℃/min，那么试样热面温度从 20℃ 升到 1000℃ 用时 58800 秒（16.3 小时）。将图 3-2 所示的 SimulationX 分析模型中的加热曲线和动态计算参数进行设置，同时设置计算时间间隔设置为 60 秒，这样整个模拟计算过程就会有 980 个点。运行图 3-2 所示的分析模型，得到试样的外表面温度变化、量热计温度变化、试样的平均温度和试样厚度方向上两端的温差曲线，如图 4-9 所示。

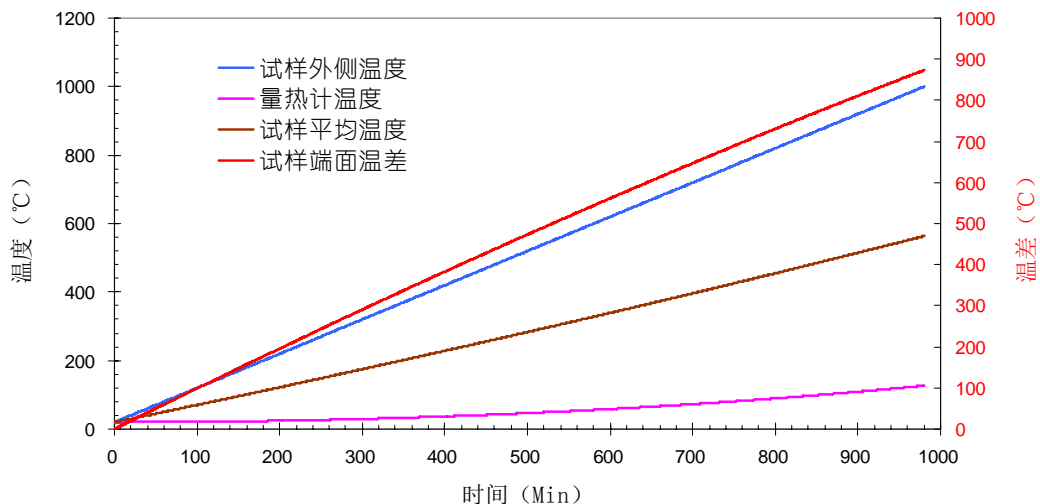


图 4-9 超低导热单试样结构 1℃/min 升温速率时各种温度随时间的变化曲线

根据图 4-9 中各种变温曲线、改进前公式(2.1.2)和改进后公式(2.1.13)得到不同处理方法的试样等效热导率，如图 4-10 所示。

升温过程中测量获得的改进前后的热导率值与设定值相比，将比较后的偏差百分比单独显示出来以更直观的表达热导率测量值偏差的大小和变化规律，如图 4-11 所示。

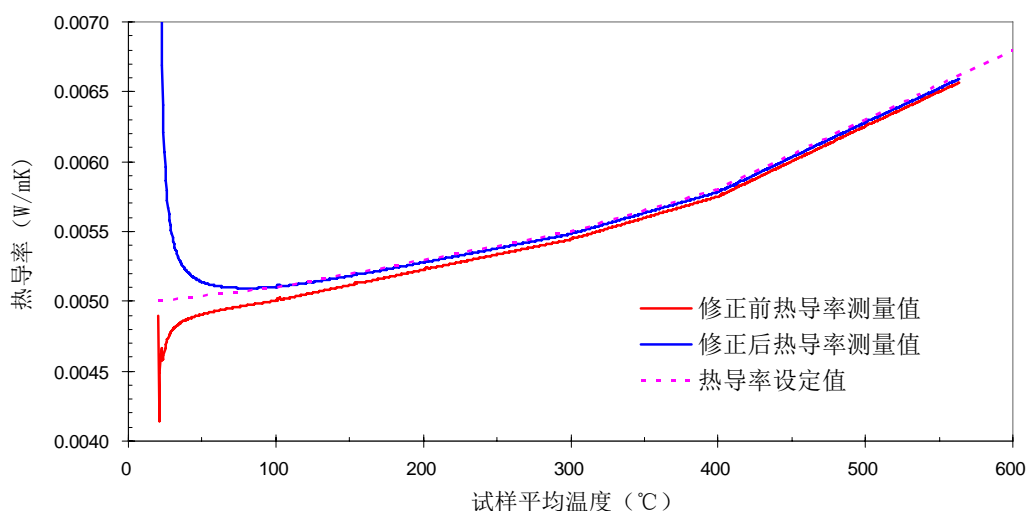


图 4-10 超低导热试样 1°C/min 升温过程中计算公式改进前后的热导率测量值与设定值比较

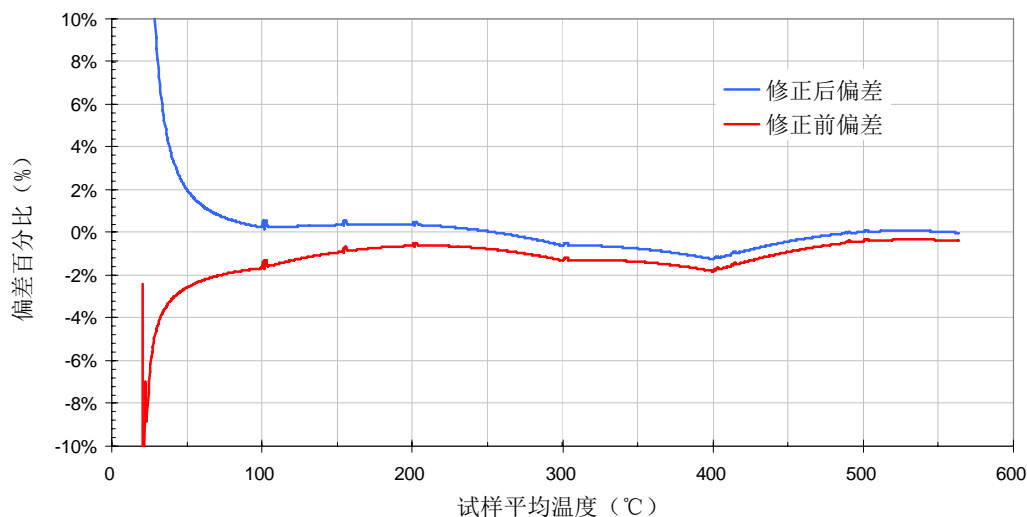


图 4-11 测量公式改正前后热导率测量值与设定值相比偏差百分比随温度的变化

从图 4-10 和图 4-11 所示的计算结果可以看出，对于较快的升温速率，只要数据采集的时间间隔足够小（如每分钟采集一次），通过改正前后的热导率测量公式都可以获得较小的测量误差，而这样的数据采集速度在实际测试中非常容易实现。并且，通过加快升温速度，还可以缩短整个试验时间。

### 4.3. 单试样低导热材料升温过程中准稳态法模拟分析

根据前期研究工作中采用有限元分析方法的分析得知，量热计厚度的改变会给测量结果带了一定的影响。现在采用增大数据采集密度的 SimulationX 软件进行分析，来检验量热计厚度对测量精度的影响。

依然按照图 3-2 所示的 SimulationX 分析模型，分别设置被测试样的热导率和比热容随温度变化数据，设置量热计的热导率和比热容随温度变化数据。设置中选择超低热导率被测试样进行有限元分析计算，超低热导率试样在 20~1500°C 温度范围内的热导率变化区间为  $0.2\text{-}0.6\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。

模拟计算中，从 20°C 线性升温到 1000°C 设置 2°C/min 的速率升温，试样热面温度从 20°C 升到 1000°C 用时 29400 秒（8.2 小时）。将图 3-2 所示的 SimulationX 分析模型中的加热曲线和动态计算参数进行设置，同时设置计算时间间隔设置为 20 秒，这样整个模拟计算过程就会有 1470 个点。

#### (1) 量热计厚度 20mm 时的准稳态法热导率测量

设置量热计厚度为 20mm，运行图 3-2 所示的分析模型，得到试样的外表面温度变化、量热计温度变化、试样的平均温度和试样厚度方向上两端的温差曲线，如图 4-12 所示。

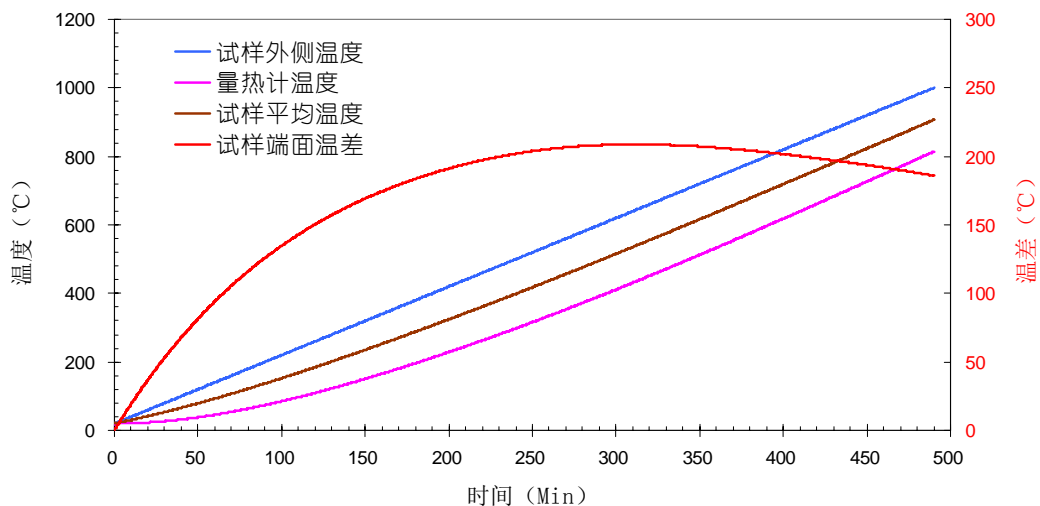


图 4-12 低导热单试样结构量热计 20mm 厚升温速度 2°C/min 时各种温度随时间的变化曲线

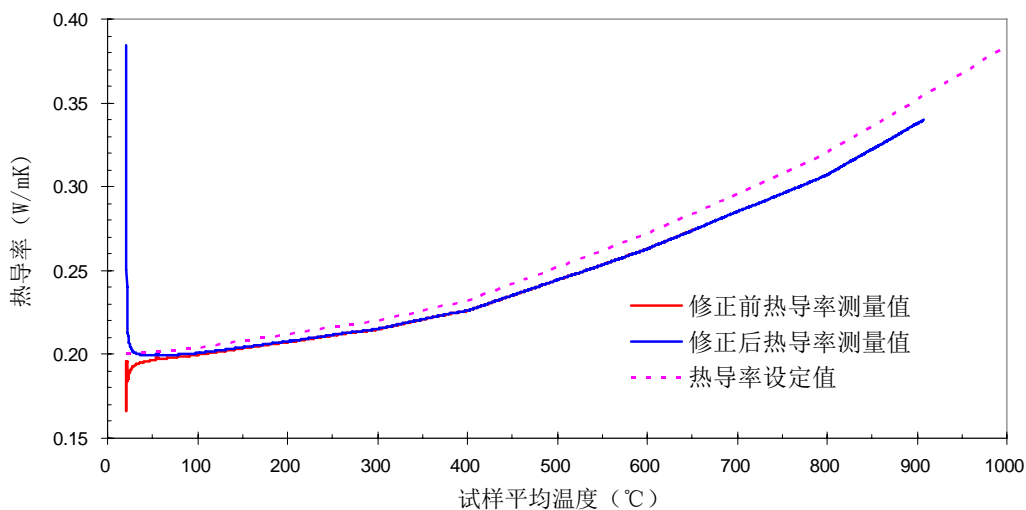


图 4-13 量热计 20mm 厚低导热试样 2°C/min 升温过程中计算公式改进前后的热导率测量值与设定值比较

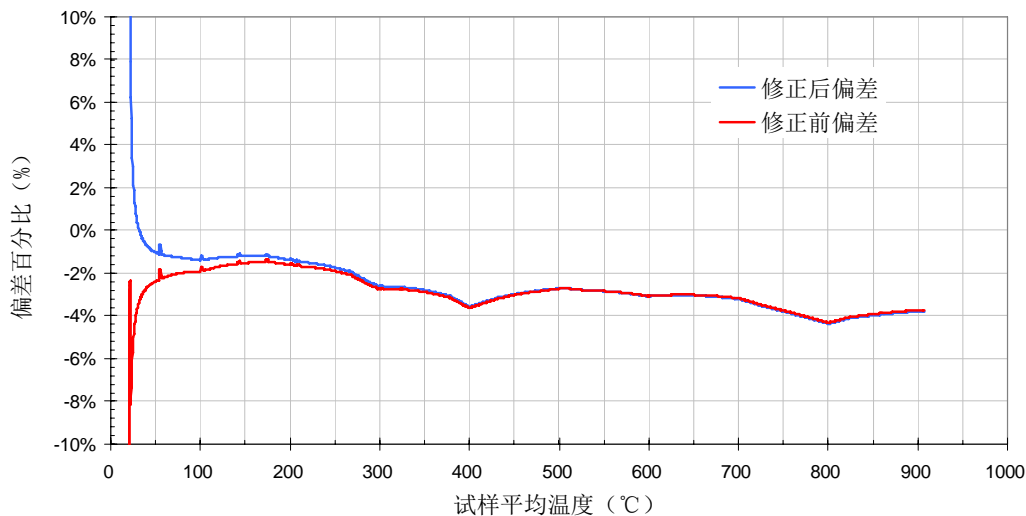


图 4-14 量热计 20mm 厚测量公式改正前后热导率测量值与设定值相比偏差百分比随温度的变化

根据图 4-12 中各种变温曲线、改进前公式(2.1.2)和改进后公式(2.1.13)得到不同处理方法的试样等效

热导率，如图 4-13 所示。

升温过程中测量获得的改进前后的热导率值与设定值相比，将比较后的偏差百分比单独显示出来以更直观的表达热导率测量值偏差的大小和变化规律，如图 4-14 所示。

为进一步的观察改进前后的效果，将图 4-14 中的温度坐标限制在 200℃ 以内，如图 4-15 所示，由此来观察热导率计算公式的改进在升温初期阶段的效果。

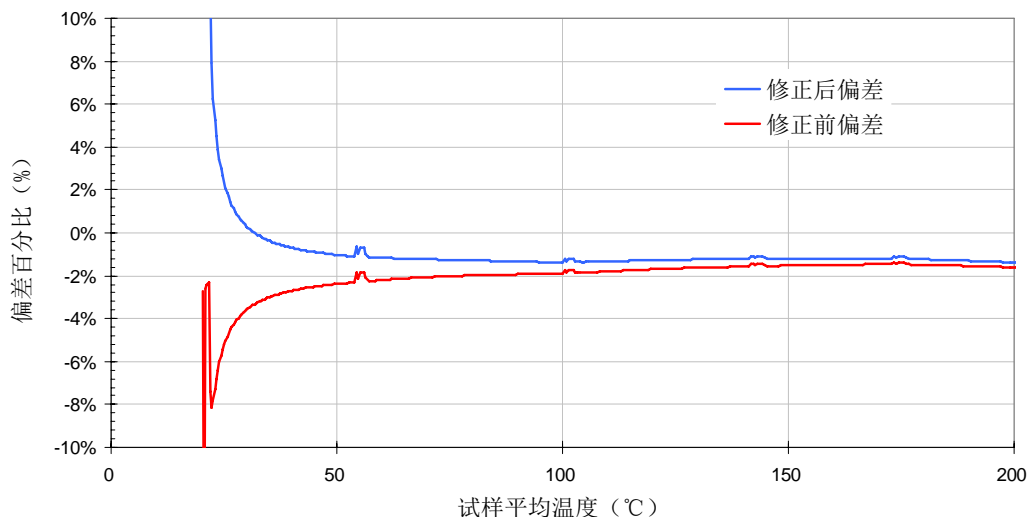


图 4-15 量热计 20mm 厚时低导热试样测试改进前后的效果比较

#### (2) 量热计厚度 10mm 时的准稳态法热导率测量

设置量热计厚度为 10mm，运行图 3-2 所示的分析模型，得到试样的外表面温度变化、量热计温度变化、试样的平均温度和试样厚度方向上两端的温差曲线，如图 4-16 所示。

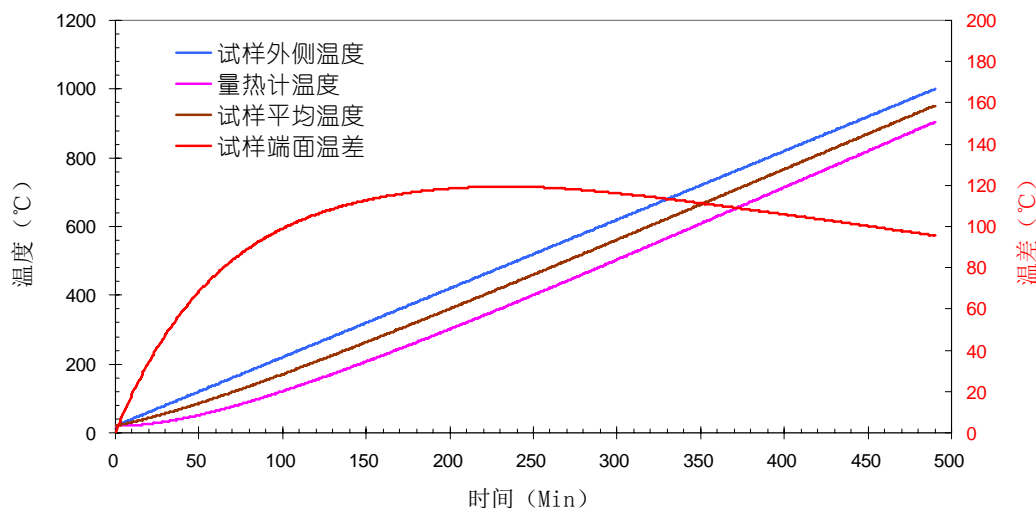


图 4-16 低导热单试样结构量热计 10mm 厚升温速度 2°C/min 时各种温度随时间的变化曲线

根据图 4-16 中各种变温曲线、改进前公式(2.1.2)和改进后公式(2.1.13)得到不同处理方法的试样等效热导率，如图 4-17 所示。

升温过程中测量获得的改进前后的热导率值与设定值相比，将比较后的偏差百分比单独显示出来以更直观的表达热导率测量值偏差的大小和变化规律，如图 4-18 所示。

为进一步的观察改进前后的效果，将图 4-18 中的温度坐标限制在 200℃ 以内，如图 4-19 所示，由此来观察热导率计算公式的改进在升温初期阶段的效果。

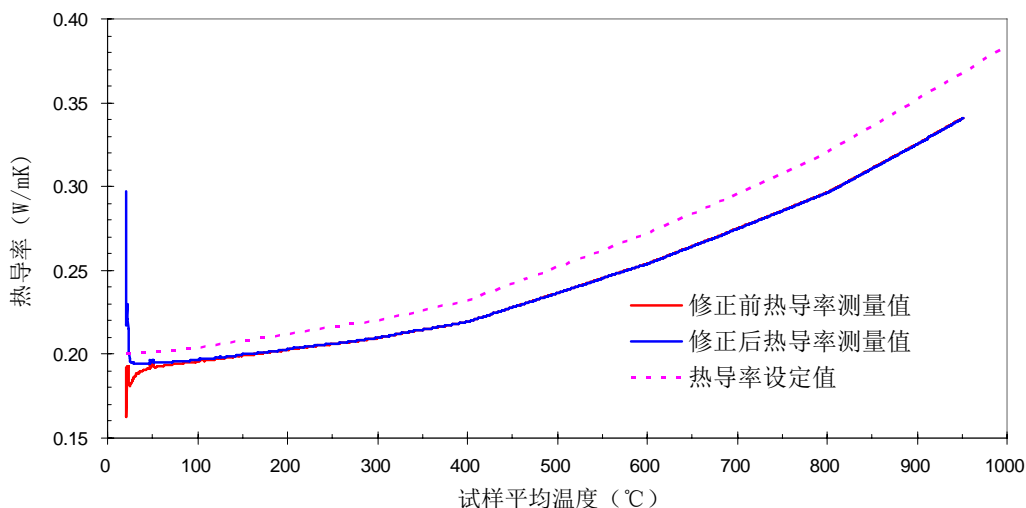


图 4-17 量热计 10mm 厚低导热试样 2°C/min 升温过程中计算公式改进前后的热导率测量值与设定值比较

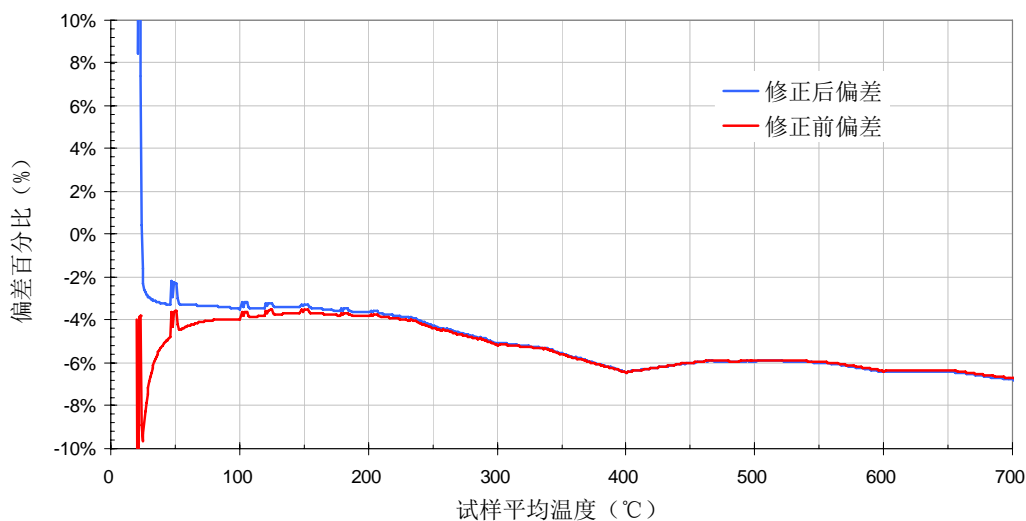


图 4-18 量热计 10mm 厚测量公式改正前后热导率测量值与设定值相比偏差百分比随温度的变化

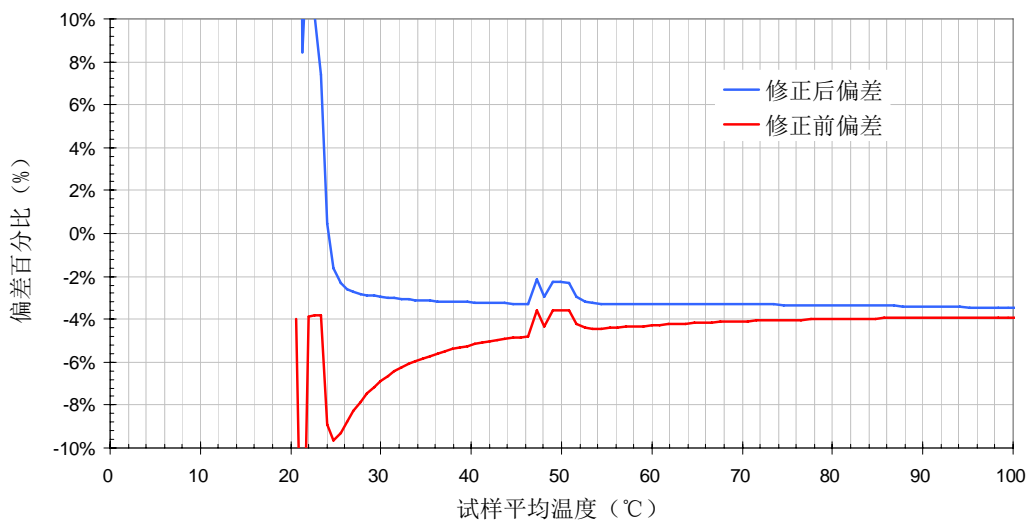


图 4-19 量热计 10mm 厚时低导热试样测试改进前后的效果比较

从以上两种不同厚度量热计的模拟计算结果可以看出，量热计厚度的减小会使得测量误差几乎成本的

增大，但采用较小厚度的量热计，在采用改正后的热导率计算公式后，会使得升温初期的热导率测量值更快速的趋于收敛。

## 5. 结论

通过以上对量热计式准稳态法热导率测试原理模型的改进，以及采用基于 Modelica 语言的图像化模块化仿真软件 SimulationX 对量热计式准稳态法测试原理模型的仿真计算，可以得出以下结论：

(1) 采用有限元方法进行模拟计算时，在升温初期（前 200℃ 区间），由于数据计算点（相当于实际测试中的数据采集点）少，造成变温速率的计算误差较大，使得热导率测量值非常缓慢的接近热导率真值。而采用 SimulationX 进行计算时，采集点密度增大了 10 倍，使得热导率测量值较快的接近热导率真值。

(2) 改进后的热导率偏差明显要比改正前更快速的减小，特别是在升温的初期明显的减小了偏差值。

(3) 采用有限元方法进行模拟计算时，在进入准稳态升温状态后（200℃ 以后区间），数据计算点少所带来的结果是热导率计算结果的偏差反而很小，这可能是在准稳态区间可以采用较大时间区间内的升温速率来获得误差更小的测试结果，密集数据点来进行计算并不一定能获得较好的结果，这点需要采用实际工程材料进行升温试验进行进一步的验证。

(4) 在量热计式准稳态法热导率测试过程中，较厚量热计（或热容较大量热计）比较薄量热计（或热容较小量热计）的测量精度更高，但针对较薄量热计采用改正后的热导率计算公式，会在升温的初期阶段测量误差更快速的减小。但综合整个温度区间的热导率测量误差，还是最好采用热容较大的量热计。

(5) 本文中的研究证明了改进后热导率计算公式可以有效的减小测量误差，但同时带来了一个问题，就是这种改进的基础是在已知试样两个端面的升温速率后，还需要已知试样的热容。因此，在量热计式准稳态法热导率测试过程中，为了得到高精度的热导率测量结果，还需要单独测量出试样的比热容。当然，如果以牺牲一定热导率测量精度为代价，就可以不用已知被测试样比热容而直接通过量热计式准稳态法测量出试样全温度量程内的热导率。