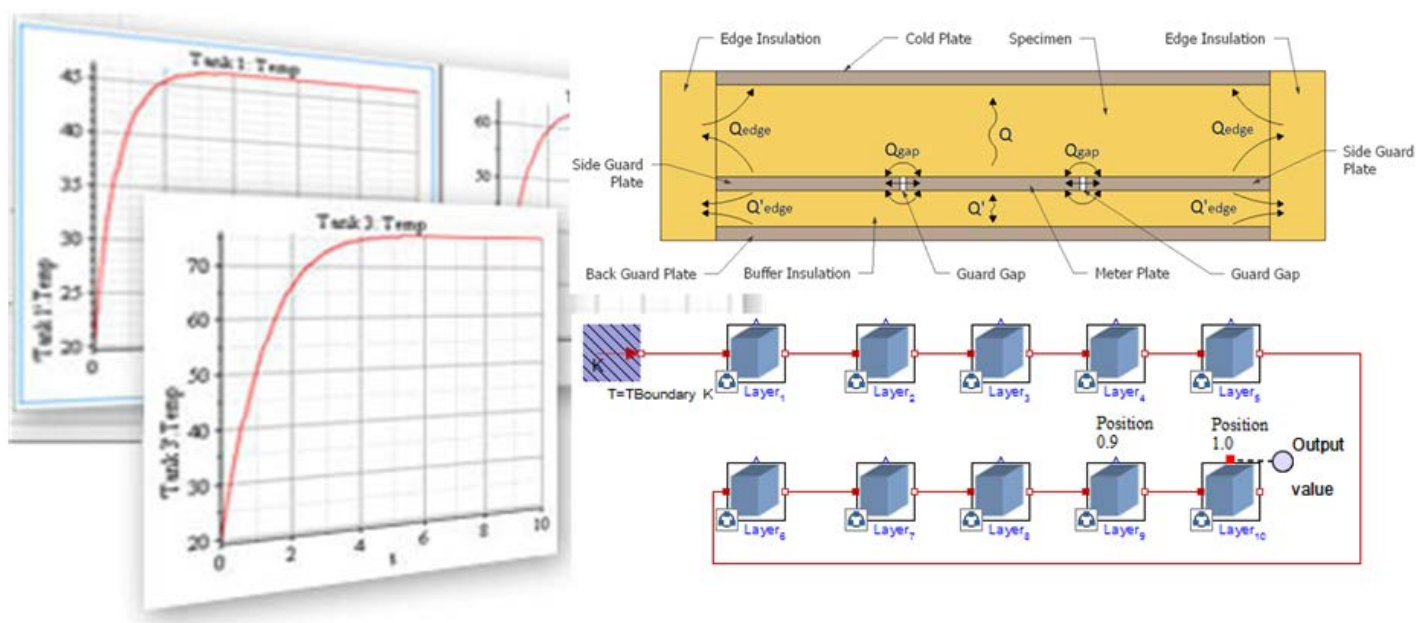


采用 MapleSim 进行缩短防护热板法 导热系数测试时间的控温方法仿真 模拟计算研究

Research on Simulation and Calculation of Temperature Control Method
for Shortening Thermal Conductivity Test Time of Guarded Hot Plate
Method by Using MapleSim



摘要：防护热板法是低导热材料导热系数测试的经典方法，尽管防护热板法测量精度高，但相应的测试时间长，被测样品的热面温度很难准确控制在设定点温度上，不利于材料导热系数重复性测量结果在相同温差下进行对比，更无法满足大批量隔热材料快速测量的需求。为解决这些问题，上海依阳实业有限公司对防护热板法计量加热器的自动化控制技术进行了研究。本文主要介绍了研究的技术路线，采用 MapleSim 软件模块化的动态数值模拟计算验证了技术路线的可行性，通过动态模拟计算结果可以直观的看到测试时间大幅度的缩短，同时本文还通过模拟计算结果介绍了在大热阻材料防护热板法测试中较低的加热功率会使得漏热现象更加明显，需要大幅度提高温差探测的灵敏度。

关键词：缩短时间，防护热板法，导热系数，加热方式，数值模拟，MapleSim

1. 引言

防护热板法作为一种经典的稳态方法，多用于防隔热材料和组件的热阻和导热系数测试中。防护热板法的测试模型就是通过周边防护手段使得计量热板中的热量只向被测样品方向进行一维传递，并最终达到稳定状态。因此在防护热板法测试中，计量热板中加热器的加载电功率控制及其测量是整个测试的核心内容之一，其技术要求主要体现在以下三个方面：

（1）加载的电功率要非常稳定，特别是达到一维热流稳态后，加载的电功率要求是稳定值，电功率的波动会对测量结果带来直接误差。

（2）对于任何被测样品，加载的电功率最好能将样品热面温度控制在一个整数值左右。结合同样受控的样品冷面温度，由此可以保证样品厚度方向上冷热面之间的温差基本都是固定值，从而提供可重复且一致的样品温差，有利于样品的重复测试结果对比，这对于非均质和各向异性隔热材料尤为重要。

（3）防护热板法作为一种稳态法，原理上就存在测试时间较长的特点，样品的热阻越大或导热系数越小，达到稳态所需的时间就越长。为此希望采用更新的技术手段缩短达到稳定的时间，提高测试效率，这点在真空隔热板和大厚度隔热材料测试中的需求十分迫切。

目前国内外防护热板法导热系数测量装置中大多数还是采用直流恒流加热方式，以期首先能保证测量的准确性，要同时满足上述三方面的要求还十分困难。尽管自动化控制技术已经发展多年并已得到广泛应用，但在防护热板装置中计量加热器的温度控制和功率测量方面还未采用自动控制技术，因为对计量加热器采用 PID 控制往往会使得加载功率波动较大而造成很大的测量误差。国内外现有防护热板法装置大多采用上述折中方法，即根据经验找出热面温度设定点与加热功率的经验关系，在测试过程中选择合适的恒定电流直接加载到计量加热器上。这种加热控制方式尽管可以保证计量加热器上加热功率的稳定和准确，但随之带来以下几方面的问题：

（1）样品热面温度无法准确恒定在设定温度点上，总是与设定温度点（一般为整数）存在较大偏差，每次测量的热面温度都不一样。这非常不利于对样品的重复性测试考核，特别是对低导热样品的测试评价尤为明显。

（2）这种恒定功率加热方式往往伴随着漫长的热场稳定时间，对低导热大热阻材料的测试耗时往

往以天为单位计算。

为了同时满足加热功率稳定准确和热面温度准确控制在设定温度上，并大幅度降低热场稳定时间，满足用户大批量样品的测试需求，上海依阳实业有限公司对防护热板法计量加热器的自动化控制以及测量技术进行了研究。本文主要介绍了研究的技术路线，采用 MapleSim 软件模块化的动态数值模拟计算验证了技术路线的可行性，通过动态模拟计算结果可以直观的看到测试时间大幅度的缩短。

2. 防护热板法导热系数测试中的加热方式

依据以下一维稳态传热的傅立叶公式，要实现样品导热系数 λ 的测量，只有两个可用来进行控制的变化参数，一个是热量 Q ，另一个是温差 ΔT 。

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T}$$

由此，防护热板法导热系数测试中建立一维稳态的加热方式基本可分为恒功率加热方式和恒温加热方式两种。

(1) 恒功率加热方式是指样品冷面保持恒定温度，样品的热面则采用一恒定的电功率进行加热，对于固定的样品尺寸而言就是采用恒定的热流密度进行加热，即使得 Q/A 为恒定值。这种加热方式所带来的结果就是样品热面温度并不受控，即样品冷热面温差 ΔT 并不会控制在指定值上。

(2) 恒温加热方式是指样品冷面保持恒定温度，样品的热面也通过加热保持一恒定温度，也就是将样品冷热面温差 ΔT 控制在指定值上。但这种控温方式带来的问题就是相应的热流密度 Q/A 存在波动而很难准确测量。

上述这两种加热方式适用于防护热板法测量装置中的所有加热部件，需说明的是，为了便于对研制或定型中的测量装置进行考核评价，希望装置中所有加热部件的加热功率在达到稳态时都可以精确测定。

3. 典型材料测试模型和数值模拟计算软件

3.1. 典型材料

在防护热板法加热方式数值模拟计算中，选择了三种典型材料以期覆盖绝大多数被测材料类型，以下分别为三种材料在室温下的热物理性能参数。

(1) NIST 1450d 标准参考材料

NIST 1450d 标准参考材料参数如表 3-1 所示。

表 3-1 标准参考材料热物理性能参数

厚度 mm	密度 kg/m^3	比热容 $J/(kg \cdot K)$	导热系数 $W/(m \cdot K)$	热阻 $m^2 K/W$
30	118	1010	0.033	0.909

(2) 真空隔热板 (VIPs)

真空隔热板的参数如表 3-2 所示。

表 3-2 真空隔热板热物理性能参数

厚度 mm	密度 kg / m^3	比热容 $J / (kg \cdot K)$	导热系数 $mW / (m \cdot K)$	内部气压 mbar	热阻 $m^2 K / W$
30	200	800	3.69	1	8.13

(3) 大厚度高热阻复合隔热材料

大厚度高热阻复合隔热材料是一种“蒙皮+隔热材料+空气隙+树脂板”形式的多芯夹层结构，如图 3-1 所示，其作用是起到隔热和隔声功能。

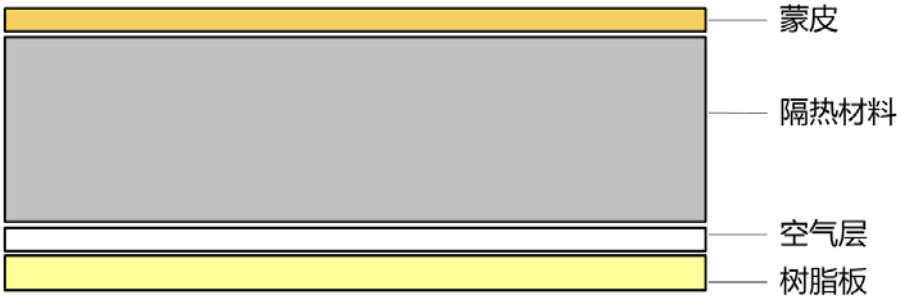


图 3-1 大厚度高热阻复合隔热材料分层结构

大厚度高热阻复合隔热材料的整体最大厚度为 130 mm，其中蒙皮和树脂板厚度保持不变，而隔热材料和空气隙会根据不同材料及其组合而发生变化。其中蒙皮为碳纤维树脂基复合材料，内饰板为树脂基复合材料，隔热材料为玻璃纤维类低密度隔热材料。这里我们选择了最大热阻结构设计以计算最大热阻时的加热稳定时间，即空气层设计为 10 mm 厚，使得低导热隔热材料的厚度尽量大以实现最好的隔热隔声效果。高热阻复合隔热材料中各分层材料室温下的热物理性能参数如表 3-3 所示。

表 3-3 大厚度高热阻复合隔热材料热物理性能参数

参数	蒙皮	隔热材料	空气层	树脂板
厚度 mm	10	104	10	6
密度 kg / m^3	1700	200	1.184	110
比热容 $J / (kg \cdot K)$	1108	985	1007	1470
导热系数 $W / (m \cdot K)$	0.75	0.020	0.026	0.04
热阻 $m^2 K / W$	0.0133	5.20	0.38	0.15

3.2. 防护热板法测试模型

为了计算分析方便，防护热板法测试模型为正方形单样品形式，如图 3-2 所示。整体护热板面积尺寸设计为 500 mm×500 mm，计量热板尺寸设计为 250 mm×250 mm，材质都为纯铝。室温和冷板温度都设为 25℃，并且假设上述三种样品材料和冷热板材料的热物理性能在室温附近不发生变化。

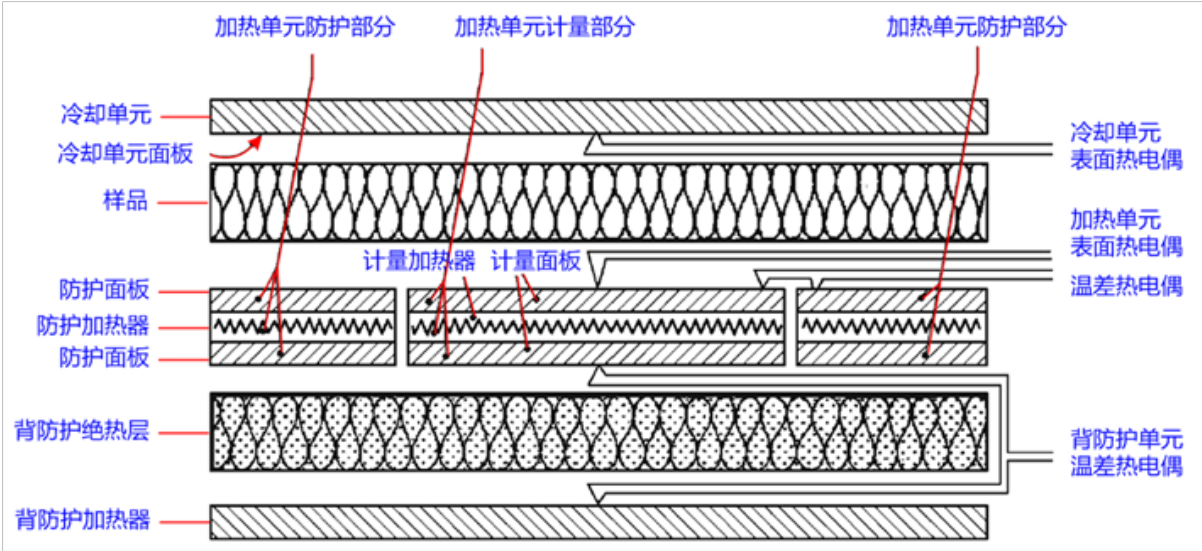


图 3-2 防护热板法单样品测试模型

3.3. 模拟计算分析软件

在传热学中可以使用很多软件进行数值模拟计算，一般常用的多为有限元分析软件，如 ANSYS、COMSOL、SOLIDWORKS 等。但对于本研究中涉及的物理量随时间变化的动态模拟计算分析，有限元法则显着笨重和繁琐，一个物理量动态变化全过程的计算分析往往需要大量的计算时间。为此，我们选择采用基于语言的 MapleSim 软件进行模拟计算分析，这种模型化的软件因为是基于物理基本模型和解析解，所以更适合动态模拟计算，十几秒钟就可以完成一个物理量动态变化全过程的计算分析。

有关数值模拟计算软件在材料热物理性能测量方法和测试技术中的应用，我们将撰文进行专门介绍。

4. 模拟计算结果

采用 MapleSim 软件分别对上述三种典型材料进行数值模拟计算，计算中设置的初始温度为 25℃，样品冷面温度也设置为 25℃，冷热面温差控制在 20℃。

4.1. 标准参考材料 1450d 两种加热方式计算结果

(1) 恒功率加热方式计算结果

为将样品冷热面温差控制在 20℃整数上，模仿实际测试中选择的加热功率 1.375 W，对于纯样品的模拟计算结果如图 4-1 所示，对于带 10mm 厚铝质冷热板的模拟计算结果如图 4-2 所示。图中红线为恒功率加热过程中样品热面温度随时间的变化曲线，蓝线为样品内部温度变化速率随时间的变化曲线。

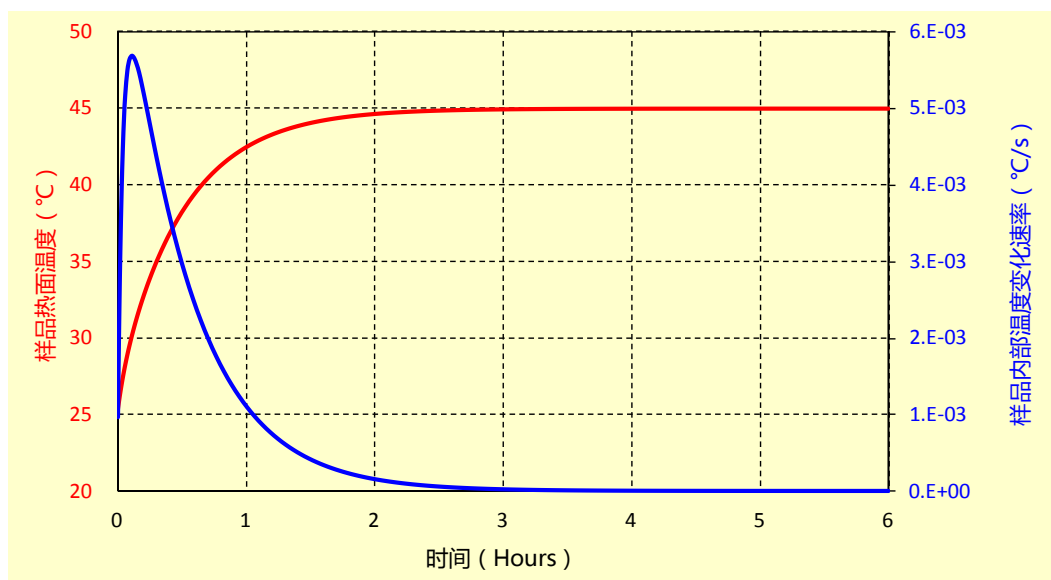


图 4-1 单纯参考材料 1450d 样品恒功率加热方式模拟计算结果

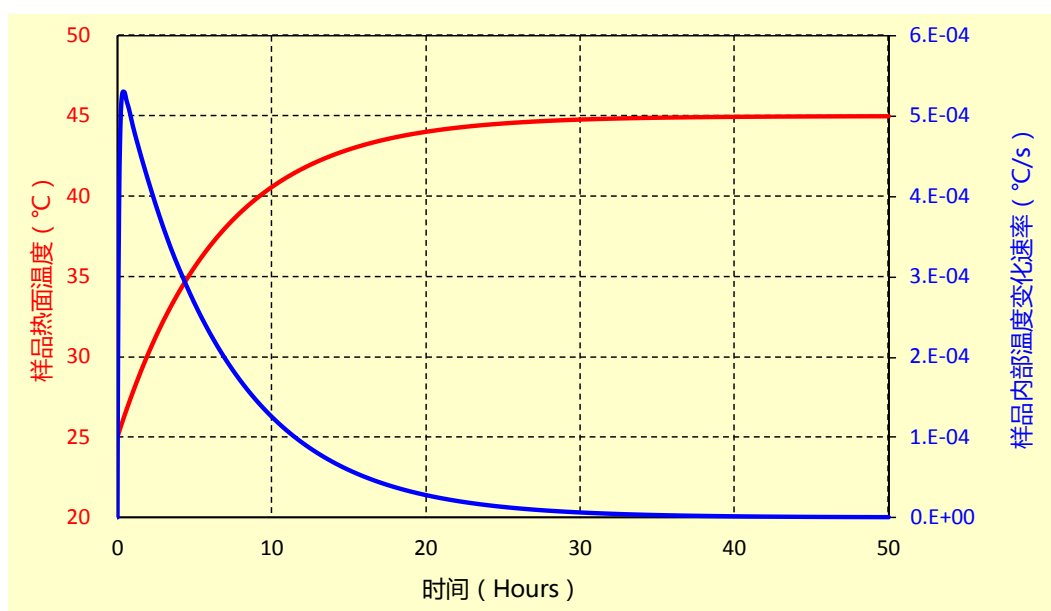


图 4-2 带铝质冷热板和参考材料 1450d 样品恒功率加热方式模拟计算结果

从这些曲线可以看出，对于纯样品的恒功率测试，从第 3 个小时开始进入稳态；而对于带 10mm 厚铝质冷热板和样品，则要从第 40 小时才能开始进入热面温度为 45°C 的稳定状态。由此给出非常具有实际意义的结果就是，采用恒功率加热方式，需要花费大量时间在金属冷热板的热稳定上，而花费在被测样品上建立稳态所需要的时间并不长。

(2) 恒温加热方式计算结果

恒温加热方式是直接将样品冷热面温差控制在 20°C 整数上，即使得热面温度为 45°C。对于纯样品和带铝质冷热板时的模拟计算结果没有差别，如图 4-3 所示。图中红线为恒温加热过程中样品内部热流量随时间的变化曲线，蓝线为样品内部温度变化速率随时间的变化曲线。从这些曲线可以看出，基本在 40 分钟后样品就开始进入热流为 1.375 W 的稳定状态，这显然要比恒功率加热方式能让样品更快的进入稳定状态，另外很重要的一点是稳定时间不受金属冷热板的影响，这在工程实现中也有重要意义。

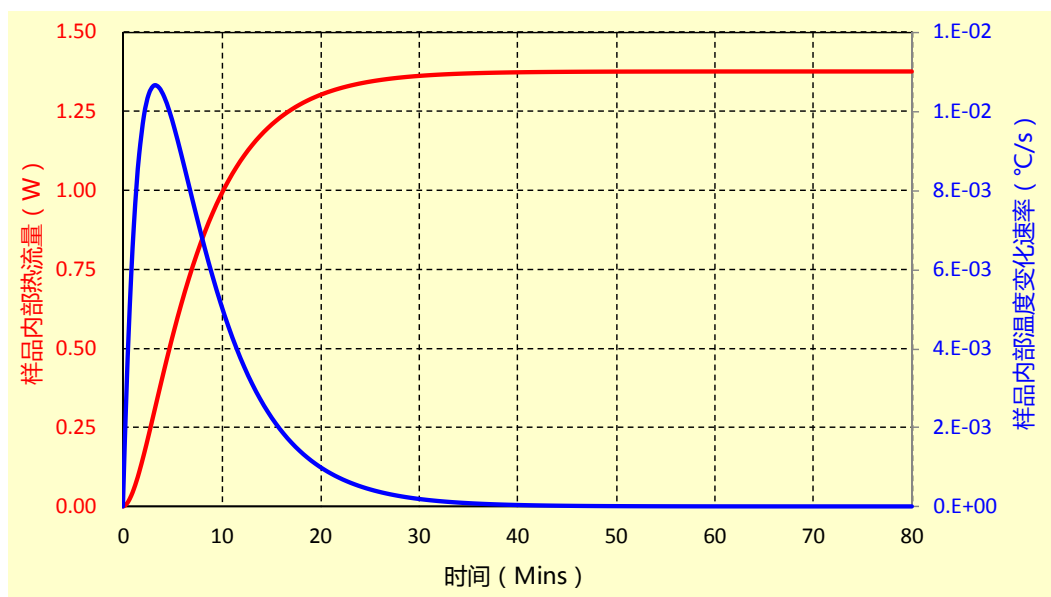


图 4-3 参考材料 1450d 样品恒温加热方式模拟计算结果

从上图可以很清楚的看出，恒温加热方式中样品内部温度变化速率要明显快于恒功率加热方式，这主要因为热量传递是以温差为动力的，而恒温加热时样品是在设定温差下进行热量传递和累积，同要实现相同温差传递的恒功率加热方式相比，恒功率加热则首先必须消耗很多时间来使得金属冷热板达到冷热面温度，并建立样品冷热面之间同样的温差，这也是恒功率加热时内部温度变化速率缓慢的原因。

(3) 恒温加热方式中不同温度时的计算结果

由于恒温加热方式是采用温差为动力使得样品内部热流和温度变化速度加快，会使得样品可以很快达到热平衡。这等同于电学中的欧姆定律，电压等同于温差，电流等同于热流，电压越大相应的电流也就越大。

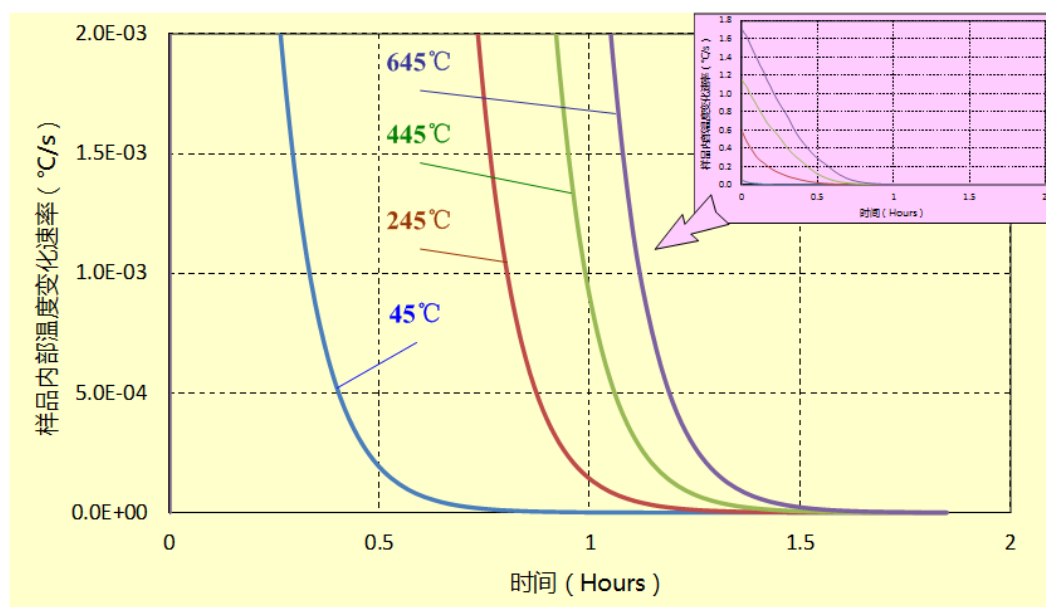


图 4-4 不同恒温温度加热时的样品内部温度变化速率对比

为了验证这种现象，在恒温加热方式中在样品热面加载不同的温度 45、245、445 和 645℃，每个温

度点恒温加热时间都为 2 小时，模拟计算结果如图 4-4 所示。为便于观察，图中将纵坐标放大后进行了显示。从图中的结果可以看出，随着热面温度的不断增大，样品达到稳定的时间并没有缩短，而是略有延长。这种与实际试验中的结果并不相同，这可能是样品内导热系数随温度的变化而引起。

恒温加热方式目前常用在稳态热流计法导热系数测试过程中，这主要是由于其中的热流测量采用了独立的热流传感器，而无需精确测量加载在电加热器上的电功率并换算成热流量。大量测量试验证明恒温加热方式的稳态热流法导热系数测试的时间要大大小于稳态防护热板法，如上海依阳实业有限公司出品的高温热流计法导热系数测试系统基本可以在不到 48 小时内完成室温~1000℃范围内 10 个整百度温度设定点下导热系数的连续测量，试验耗时基本与上述理论计算值接近。

4.2. 真空隔热板两种加热方式计算结果

真空隔热板(VIPs)是目前隔热材料中导热系数最低的材料，很薄真空隔热板可以具有很大的热阻。我们选择真空隔热板进行模拟计算就是为了观察防护热板法测试这类大热阻样品时的消耗时间。

(1) 恒功率加热方式计算结果

为了将样品冷热面温差控制在 20℃整数上，模仿实际测试中选择合适的加热功率 0.15375 W，然后分别对纯真空绝热板样品和加上两块 10mm 厚冷热板后的测试模型进行模拟计算，结果如图 4-5 和图 4-6 所示。图中红线为恒功率加热过程中样品热面温度随时间的变化曲线，蓝线为样品内部温度变化速率随时间的变化曲线。从这些曲线可以看出，对于纯粹的真空绝热板样品，约在 30 个小时后样品进入稳定状态，而增加了铝质冷热板后，则样品则会从第 350 小时（将近 15 天）后开始才进入热面温度为 45℃的稳定状态，这基本上是无法接受的测试时间。

上述模拟计算结果也再次证明了恒功率加热过程中大量加热时间消耗在了金属冷热板的稳定上，对于真空绝热板这种超低导热系数和大热阻材料而言，采用经典的防护热板法需要漫长的测试时间，这也是极少看到有人采用防护热板法进行真空绝热板测试的主要原因。

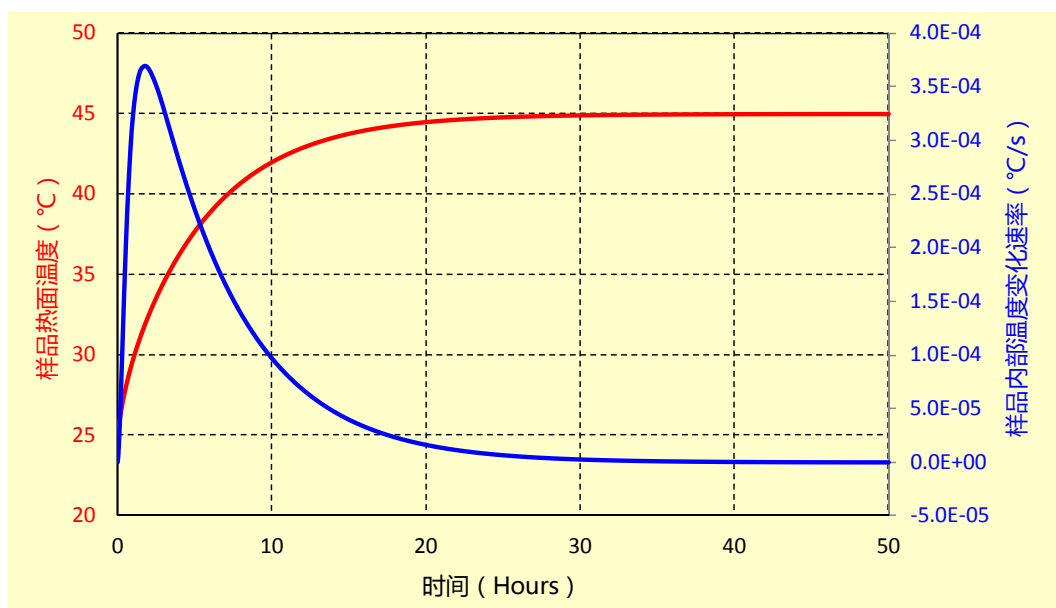


图 4-5 单纯真空绝热板样品恒功率加热方式模拟计算结果

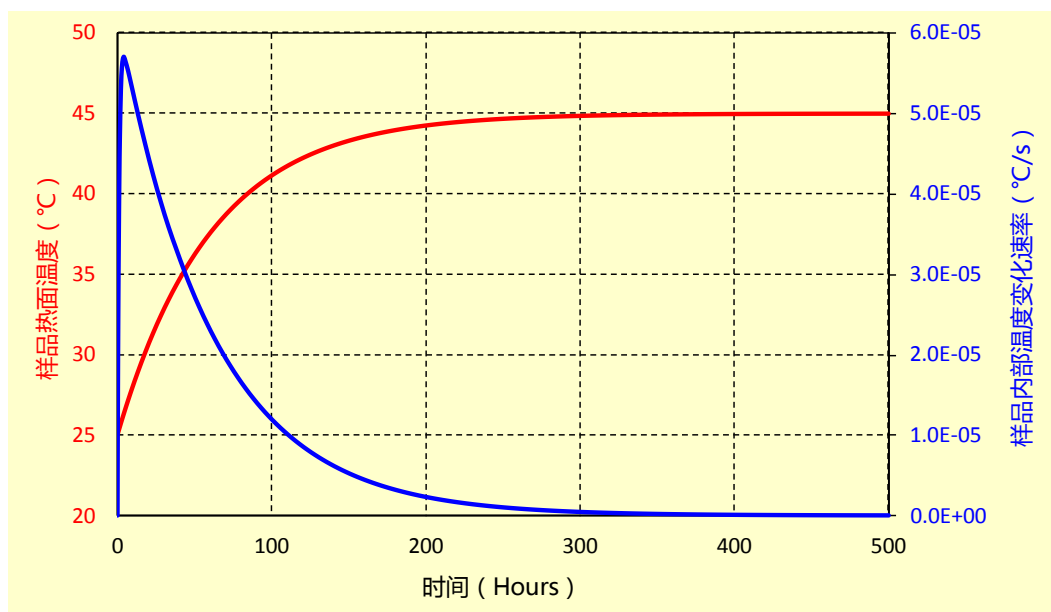


图 4-6 带铝质冷热板和真空绝热板 (30mm 厚) 样品恒功率加热方式模拟计算结果

(2) 恒温加热方式计算结果

恒温加热方式是直接将样品冷热面温差控制在 20°C 整数上, 即使得热面温度为 45°C。对于纯真空绝热板样品和带铝质冷热板时的模拟计算结果没有差别, 如图 4-7 所示。图中红线为恒温加热过程中样品内部热流量随时间的变化曲线, 蓝线为样品内部温度变化速率随时间的变化曲线。从这些曲线可以看出, 从第 7 小时开始样品进入内部热流为 0.15375 W 的稳定状态, 显然要比恒功率加热方式能让样品更快的进入稳定状态而具有实际意义。同样, 另外重要的一点是稳定时间不受金属冷热板的影响。

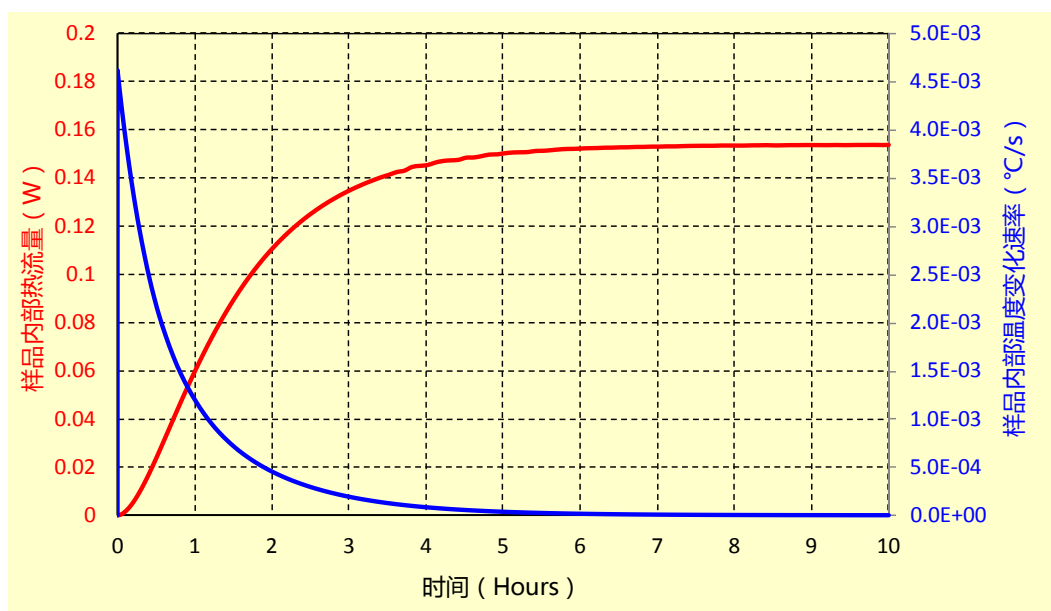


图 4-7 真空绝热板 (30mm 厚) 样品恒温加热方式模拟计算结果

由上述针对真空绝热板防护热板法导热系数测试所进行的两种加热方式模拟仿真计算结果可以看出, 针对大热阻样品的测试, 只有恒温加热方式在实际应用中可以接受, 但存在的问题则是很难准确测量加热稳态时的加热功率。为了规避这个难题, 目前业界普遍采用的是稳态热流计法, 即采用独立的热

流量计来测量流经样品的热流密度，但代价是降低测量精度。这是因为热流量计精度较差，还需要采用防护热板法装置进行校准，但这样的好处是可以有效提高测试效率。

4.3. 大厚度高热阻复合隔热材料两种加热方式计算结果

为了说明问题，将复合结构隔热材料简化为单一固体材料构成的大厚度高热阻样品，其总厚度为 130mm，导热系数为 0.02W/mK ，总热阻为 $6.5\text{m}^2\text{K/W}$ 。

(1) 恒功率加热方式计算结果

为了将样品冷热面温差控制在 20°C 整数上，模仿实际测试中选择合适的加热功率 0.1923W 。经过模拟计算后分别到纯样品和带金属冷热板样品的结果如图 4-8 和图 4-9 所示。

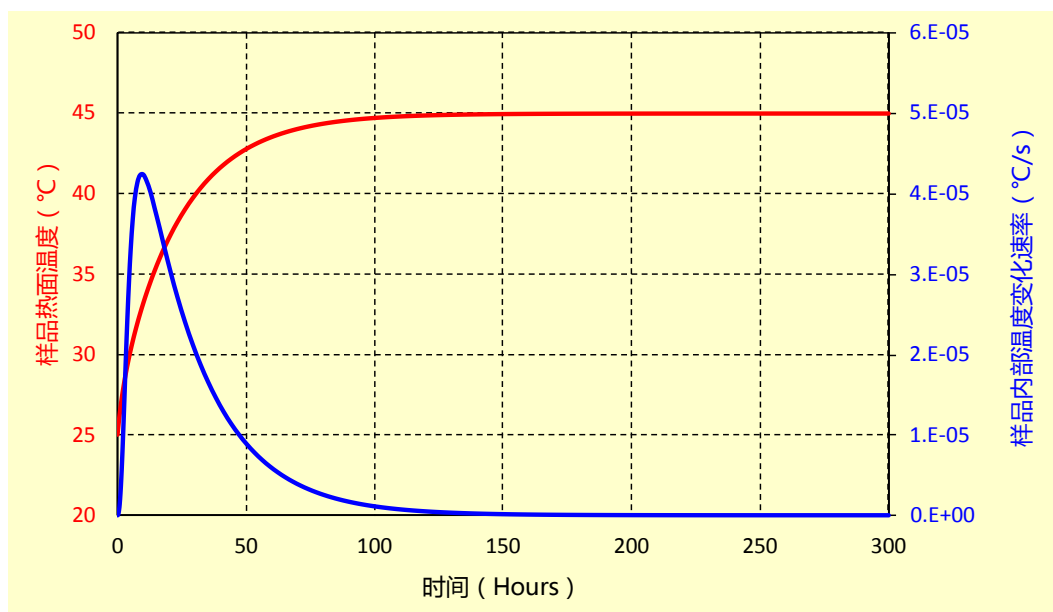


图 4-8 单纯复合材料样品恒功率加热方式模拟计算结果

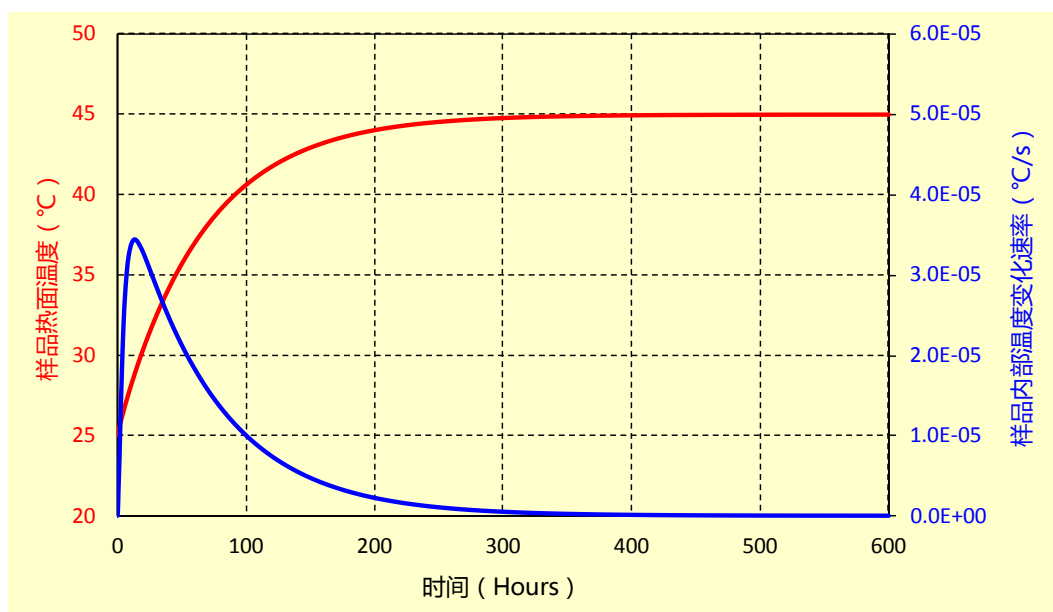


图 4-9 带铝质冷热板和复合隔热材料（130mm 厚）样品恒功率加热方式模拟计算结果

图中红线为恒功率加热过程中样品热面温度随时间的变化曲线，蓝线为样品内部温度变化速率随时间的变化曲线。从这些曲线可以看出，对于纯粹的复合材料样品，约在 150 个小时后样品进入稳定状态，而增加了铝质冷热板后，则样品则会从第 400 小时后开始才进入热面温度为 45℃ 的稳定状态，这些显然要比真空绝热板稳定时间还要长很多。

（2）恒温加热方式计算结果

恒温加热方式是直接将样品冷热面温差控制在 20℃ 整数上，即使得热面温度为 45℃，模拟计算结果如图 4-10 所示，其中有无金属冷热板对模拟计算结果的影响可以忽略不计。

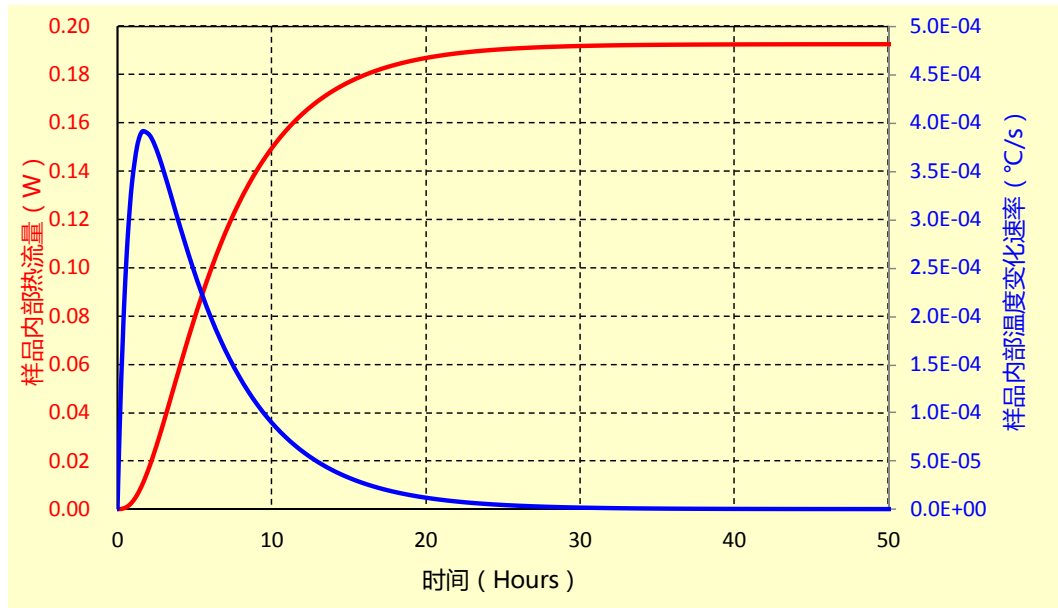


图 4-10 大厚度高热阻复合隔热材料（130mm 厚）样品恒温加热方式模拟计算结果

图 4-10 中红线为恒温加热过程中样品内部热流量随时间的变化曲线，蓝线为样品内部温度变化速率随时间的变化曲线。从这些曲线可以看出，从第 30 小时开始样品进入内部热流为 0.1923 W 的稳定状态，显然要比恒功率加热方式能让样品更快的进入稳定状态而具有实际意义，可见对于大厚度高热阻复合材料的测试，每个温度点导热系数测试耗时基本也要在 1~2 天左右。

5. 分析和结论

针对三种不同热阻范围的典型隔热材料，利用 MapleSim 软件对恒功率和恒温两种加热方法的模拟分析可以发现：

（1）恒功率加热时材料内部的温度场变化比较缓慢，热量在材料内部传递是一个由加热面逐渐扩散到内部的缓慢的过程。但恒功率加热方法简单，并且由于功率值恒定，而稳态时加热功率和温度波动较小，所以精度比较高。加上这种加热方式工程上易于实现，使得恒功率加热是目前国内外防护热板法导热仪中最常用的加热方法。

（2）恒温加热时材料内部温度场变化比较快，热量可以快速的由加热面传递到材料的内部并达到稳定，稳定时间要远小于恒功率加热法，而且样品热面温度可以准确控制在设定点温度上以保证样品厚

度方向上的温差为规定常数，这些在低导热材料防护热板法测试中非常具有现实意义。一般恒温加热方法普遍采用 PID 控制技术实现，但 PID 控制热面温度稳定时，加热功率并不是连续恒定不变，而且还存在波动，实现准确测量对控制系统硬件的技术要求非常高。

(3) 目前国内外大多数防护热板法导热仪基本都采用的是恒功率加热方式，主要是由于没有很好解决 PID 恒温加热方式中的加热功率准确控制和测量这两方面的问题。特别是对于高热阻（大厚度和超低导热系数）材料的测试，样品热面温度控制过程中的过冲超调，温度过冲后回调非常缓慢，因此对 PID 算法的要求也非常高以避免过冲超调，否则体现不出恒温加热方式的优越性。

(4) 由于恒功率和恒温加热方式各具特点，在实际应用中存在着相应的技术难题。为了扬长避短，对于高热阻（如真空绝热板）材料导热系数测试，有些导热系数测试仪器采用了达到稳态时间更短的恒温加热方法以满足工业生产质量品控需要。但为了规避热流测量中遇到的技术难题，则采取了牺牲精度保速度的策略，即采用热流计法在一维传热回路中介入独立的热流计来测量热流密度。这种热流计法充分发挥了恒温加热方式的特长，但存在热流计测量误差较大的问题。另外，热流计需要采用防护热板法进行校准，特别是对于高热阻导热系数测试中的低热流密度的测量误差较大，这种方法仅适用于工业生产中的粗放式检测。

(5) 从上述三种典型隔热材料模拟计算中可以看出，对于高热阻材料的导热系数测试，达到稳态时的热量非常小。这也就是说由于材料的隔热性能太优异，使得只要加载很小的热量就能达到设定的冷热面温差，而这种小热量则对防护热板法护热装置提出了更高要求。由于计量热板所需热量小，热板防护装置引起的温度不平衡会使得漏热效应显著提高，同时也对温差探测器提出更高灵敏度要求。如在上述标准参考材料测试中稳态时的热量为 1.375 W，对于这种热量下的可接受的漏热百分比所对应的护热能力，如果应用在上述真空绝热板和高热阻复合材料测试中稳态时的热量中（0.15375 W 和 0.1923 W），那么相同的护热能力所带来的漏热误差将由于热量降低 10 倍而使得误差增大 10 倍。另外，高热阻小热量防护热板法中的漏热问题在单样品测试中特别显著，对于大尺寸样品更为突出，这是因为单样品测量中护热面积为整个样品的横截面加四周侧面，具有巨大的护热面积和漏热通道，而这在双样品测试中则只存在较小面积的四周侧面护热，这也是高精度防护热板法装置普遍采用双样品模式进行测量的原因。因此，为了减小单样品高热阻材料防护热板法测试中大面积漏热问题，必须进一步提高温差探测器的灵敏度，并尽可能减少温差探测器引线数量避免带来相应的引线漏热问题。