

稳态保护热板法热导率测试技术应用——Application Note: 003

护热板法导热系数测定仪测量材料 半球向全发射率测试模型有限元模拟计算分析



摘要：根据保护热板法导热系数测试的国标和 ISO 标准中对热辐射率的规定，本文在保护热板法测量原理的基础上建立了相应的半球向全发射率测试模型，并对半球向全发射率测试模型进行了有限元模拟分析计算，从理论上摸清了测试模型中的温度分布和热流分布情况，证明了保护热板法热导率测试方法应用在试样表面半球向发射率测量存在巨大的原理性误差，但同时揭示了另外一种准确有效的半球向全发射率测试方法，即采用稳态热流计法热导率测量装置来测量试样表面的半球向全发射率。同时，也表明了采用各种稳态法测量发射率过程中，直接测量热流密度往往会更有效，测量精度会更高。

1. 简介

在依阳公司护热板导热系数测定仪的应用文章 Application Note: 002 “护热板法导热系数测定仪测量测量半球向全发射率原理模型有限元模拟分析”中，已经从原理模型方面对护热板法测量半球向全反射率进行了有限元模拟分析和计算，并获得了很多有用的结果和试验参数。

本文将在上述研究的基础上，采用 SolidWorks 有限元分析软件，对实际测试模型进行有限元模拟分析，以期获得实际测试中的相关结果和相关参数，为采用保护热板法导热系数测定仪测量半球向全发射率提供参考和指导。

2. 试验模型

根据保护热板法发射率测量原理以及保护热板法导热系数测量装置的结构，可以建立的有限元模拟计算模型如图 2-1 所示。

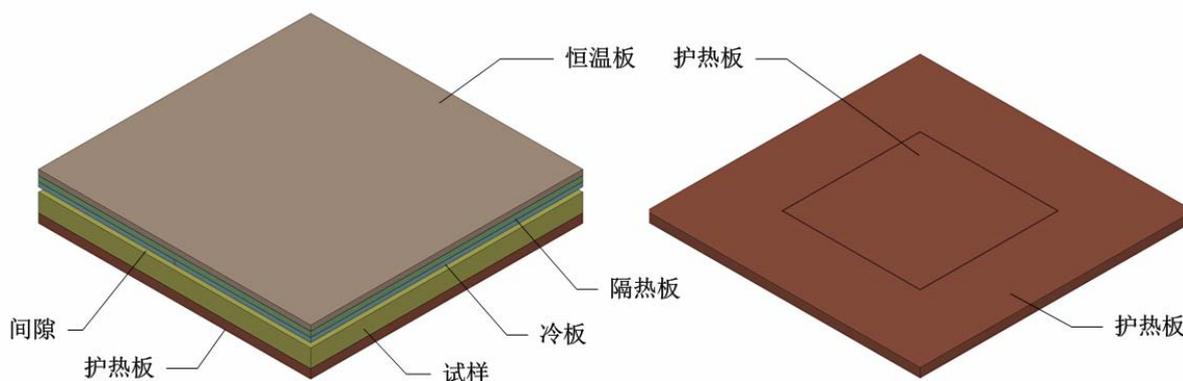


图 2-1 护热板法发射率测量的有限元模拟计算试验测试模型

有限元模拟计算模型的整体尺寸完全按照保护热板法导热系数测定仪的结构尺寸设计，其中护热板的外框尺寸设计为 $300 \times 300\text{mm}$ ，中心加热板尺寸为 $150 \times 150\text{mm}$ ，中心加热板与护热板之间的缝隙为 1mm ，如图 2-1 所示。

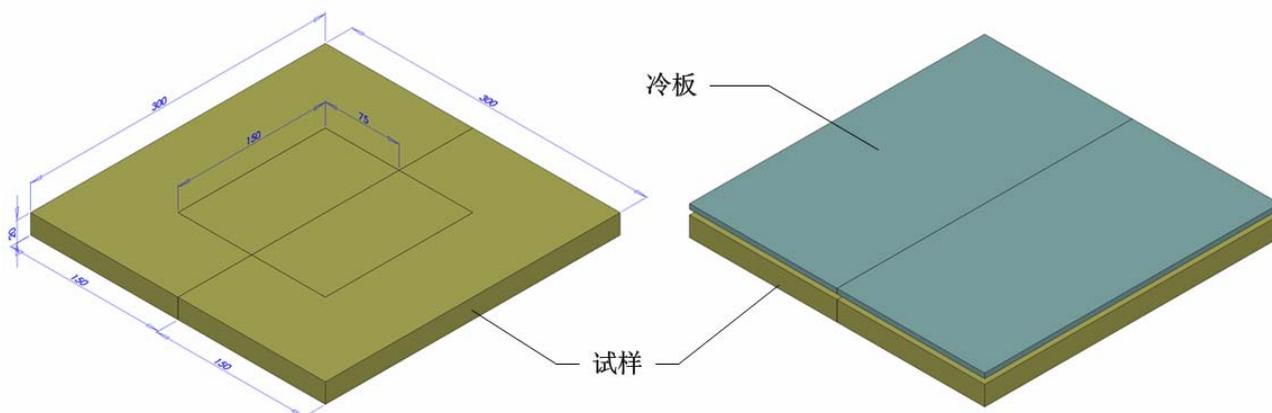


图 2-2 试验测试模型中的试样和冷板模型的设计结构

如图 2-2 所示，试样的整个尺寸 $300 \times 300 \times 20\text{mm}$ ，为了便于观测计算结果，将两块 $150 \times 75 \times 20\text{mm}$

矩形块和两块 U 型块试样拼接一个完整试样，这样就可以从两块试样的中心连接线上观测中心试样的温度分布和热流密度分布。同理，将 $300 \times 300 \times 5\text{mm}$ 的整体冷板用两块 $300 \times 150 \times 5\text{mm}$ 的矩形金属板拼接而成，由此便于观测冷板中心线的温度分布。

根据“护热板法导热系数测定仪测量测量半球向全发射率原理模型有限元模拟分析”中的计算结果，将冷板与试样之间的间距设置为 5mm 。

3. 参数设定

3.1. 模型中部件的物理性能参数设定

根据保护热板法导热系数测定仪中各个部件所用材料的设定有限元模拟模型中的相关物理性能参数。

(1) 加热板和护热板参数设定：保护热板法导热系数测定仪中加热板和护热板采用的纯铜材料，有限元模型中则选择了对应的纯铜物理性能，其中密度为 $8900\text{kg}/\text{m}^3$ ，热导率为 $390\text{W}/\text{mK}$ ，比热容为 $390\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

(2) 试样的参数设定：被测试样材料选择了 ABS 塑料，其中密度为 $1020\text{kg}/\text{m}^3$ ，热导率为 $0.226\text{W}/\text{mK}$ ，比热容为 $1386\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。在有限元计算中，可以根据不同的隔热材料被测试样类型分别选择低热导率 $0.0226\text{W}/\text{mK}$ 和超低热导率 $0.005\text{W}/\text{mK}$ 。

(3) 冷板的参数设定：冷板选择的铝合金材料，其中密度为 $2700\text{kg}/\text{m}^3$ ，热导率为 $200\text{W}/\text{mK}$ ，比热容为 $900\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

(4) 隔热板由于也选用的 ABS 塑料，与试样的材质相同，但热导率在有限元模拟计算中始终保持为 $0.226\text{W}/\text{mK}$ 不变。

(5) 恒温板的参数设定：恒温板实际上是模拟的护热板法导热系数测定仪中的循环水冷板，材质与冷板的材质相同，都是铝合金板。

3.2. 有限元网格大小设定

根据“护热板法导热系数测定仪测量测量半球向全发射率原理模型有限元模拟分析”中的计算结果，有限元网格划分为标准网格，不进行自动过渡，其中整体网格大小为 15mm ，公差为 0.5mm 。

4. 有限元模拟计算结果和分析

4.1. 试验模型的验证

首先对上述所建立的试验测试模型进行有限元计算验证，以验证所建模型的合理性和准确性。

在验证过程中，设置 ABS 塑料试样的热导率为 $0.226\text{W}/\text{mK}$ ，试样靠近冷板的上表面的中心区域（即于护热板热导率测定仪中心位置处的加热板尺寸完全相同的区域，试样中心 $150 \times 150\text{mm}$ 面积区域）的半球向发射率从 0.95 变化到 0.15 ，试样的四周其他区域半球向发射率为 0.1 。这样的设置是为了模拟实际测试中在试样表面的四周区域覆盖上一层反射膜，即试样在 $150 \times 150\text{mm}$ 面积区域外几乎不产生热辐射。

同时设定冷板下表面半球向全发射率为 0.98 ，冷板与试样之间的间距为 5mm ，设定恒温板温度为 0°C ，加热板和护热板温度都为 60°C 。除了试样上表面和冷板下表明外，其他表面都为绝热面。在试样表面发射率为 0.95 时的计算结果如图 4-1 所示。

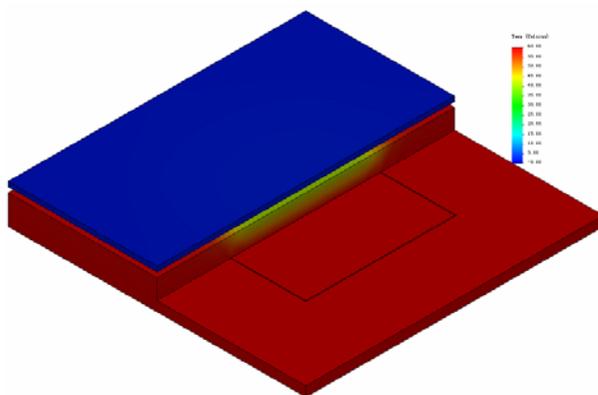


图 4-1 发射率为 0.95 时的测试模型温度分布图

从图 4-1 所示的有限元计算结果的中心线上提取出的试样表面和冷板表面温度分布和由此所计算出的试样表面发射率分布，如图 4-2 所示。

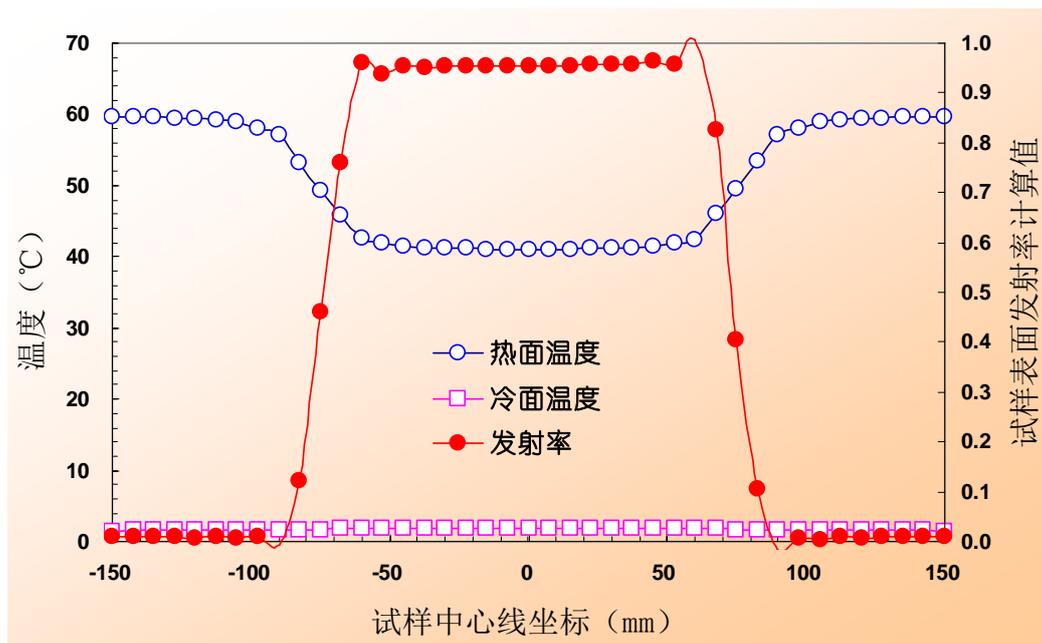


图 4-2 发射率为 0.95 加热板恒定温度 60℃时的有限元模拟计算结果

从图 4-2 所示的温度分布和计算结果可以看出，由于试样表面有两种发射率分布，使得试样表面的温度出现变化，特别是在 $\pm 75\text{mm}$ 处（反射膜遮盖内框边缘或加热板和护热板连接处）试样的温度变化比较剧烈。从图中还可以看出，在 $\pm 50\text{mm}$ 的正方形区域内，温度分布是均匀的，根据此区域内的温度测量结果所计算出的发射率数据也是均匀的。

同时，由于在试样上的温度分布不均匀，试样的四周温度高，中间区域温度低，这势必会造成流经试样厚度方向上的热量不仅仅是从加热板输出的热量，还会包含有从护热板通过试样四周传递到试样中心区域的侧向热流。这种现象所带来的影响将在下节进行模拟计算和分析。

从图 4-1 所示的有限元计算结果的中心线上提取出的热流密度分布如图 4-3 所示。

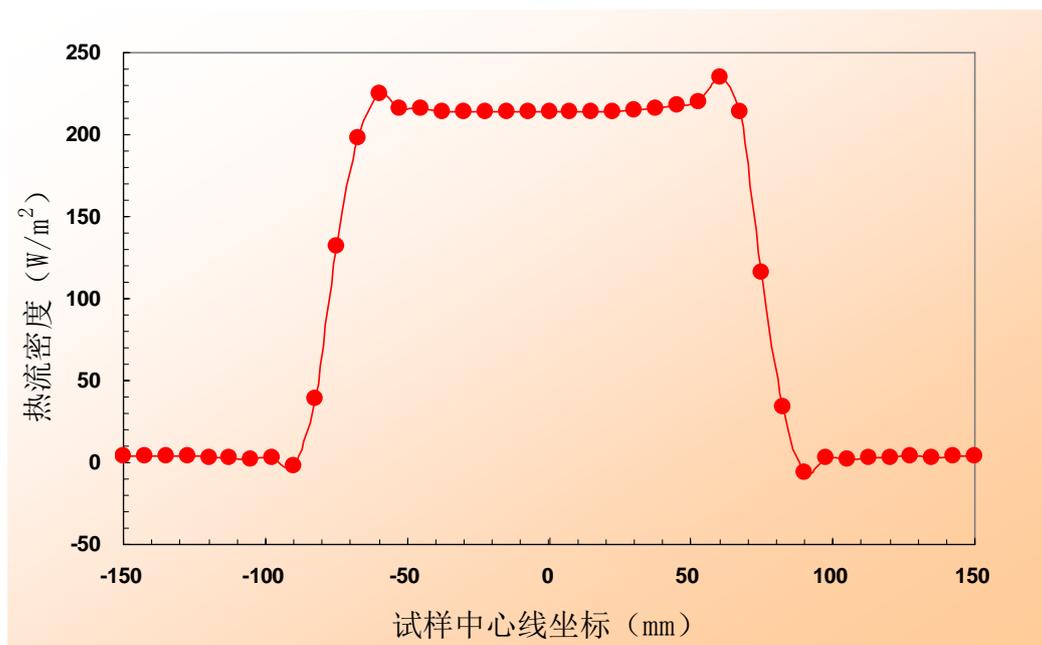


图 4-3 发射率为 0.95、加热板 60℃、恒温板为 0℃时试样表面热流密度分布

从图 4-3 所示的计算结果同样可以看出，热流密度的分布也是在 $\pm 50\text{mm}$ 的正方形区域内非常均匀。

4.2. 恒定加热功率时的计算结果

以上模拟计算是设定加热板温度为 60℃ 时的计算结果，从上述结果中可以看出，由于在试样上的温度分布不均匀，试样的四周温度高，中间区域温度低，这势必会造成流经试样厚度方向上的热量不仅仅是从加热板输出的热量，还会包含有从护热板通过试样四周传递到试样中心区域的侧向热流。

为了确定侧向流入试样中心区域热流的大小，下面将采用恒定加热功率进行计算分析。

为了保证铜质加热板没有侧向热损，对加热板所加载的功率要使得加热板温度与护热板温度相同。前面计算已经设定护热板温度为 60℃，那么在安装了发射率为 0.95 的试样后，加热板温度要达到 60℃ 所需要加载的加热功率为 4.143W。那么根据此加载功率进行有限元计算后的结果如图 4-4 所示，图中的发射率计算中所用的热流密度是按照 $Q/A = 4.143W / (0.15mm \times 0.15mm)$ 进行计算，即以实际加载功率计算流经试样厚度方向上的热流密度。

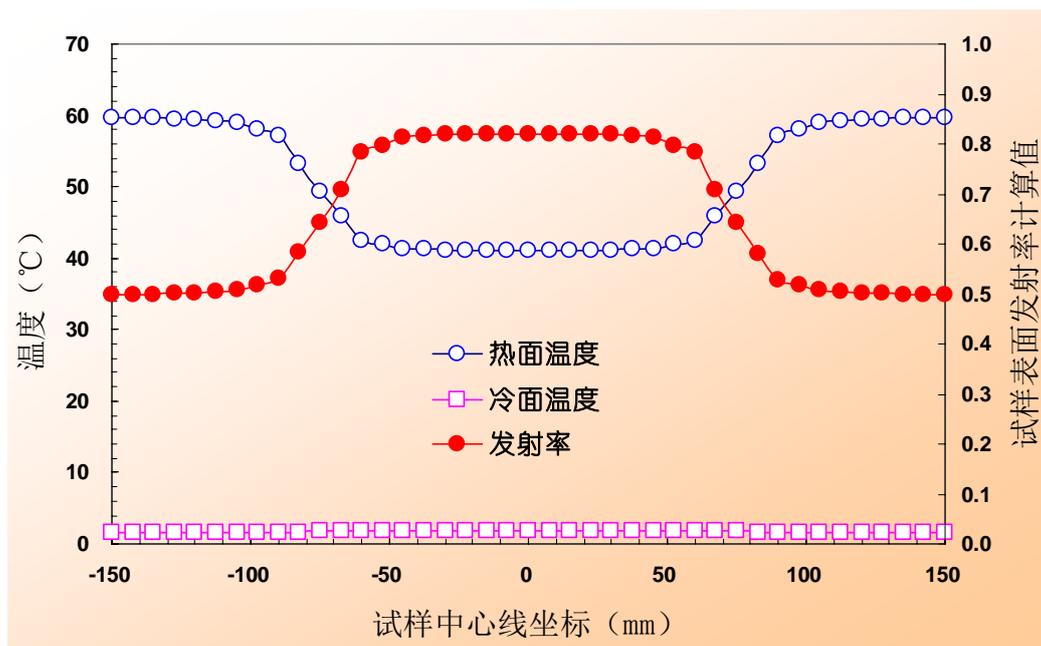


图 4-4 发射率为 0.95 加热板加热功率 4.143W 时的有限元模拟计算结果

从图 4-4 所示的计算结果可以看出，恒定加热功率 4.142W 时试样的表面温度和冷板表面温度与图 4-2 所示的恒定温度 60℃ 时的温度分布完全相同，但热流密度按照加载功率计算取 $184.13 W/m^2$ ，则发射率计算结果 ($\pm 50mm$ 的正方形区域内) 为 0.82 左右，明显的与设定值 0.95 偏低很多。另外去观测试样表面的热流密度分布，也与图 4-3 所示的结果完全相同，中心区域的热流密度约为 $214 W/m^2$ 左右。由此可以看出，约有 $214 - 184 = 30W$ 的热流是有试样侧向流入带来的额外热量。这说明，如果在实际测试试验中，如果仅仅通过测量加载到加热板上的加热电压和电流得到的加热功率来按照传统的方法来计算流经试样的热流密度，所获得的发射率计算结果会发生巨大的偏差，偏差至少在 13% 以上。

解决这个问题可能会有以下两种方式，

(1) 热流计法

在这种方法中，不采用加热功率作为热流密度测量参数，直接采用薄膜热流计的方式测量流经试样厚度方向上的热流，这也证明了采用热流计法热导率测量装置也是可以测量材料表面半球向发射率。

(2) 降低试样与冷板的温差

上面我们设定的加热功率使得加热板温度达到了 60℃，如图 4-4 所示，试样和冷板之间中心位置处约有 40℃ 左右的温差，试样与冷板之间边缘位置处约有 55℃ 的温差，试样边缘与试样中心约有 18℃ 左右的温差，就是这样比较大的温差造成了热量从试样边缘进入试样中心区域。由此，通过降低温差来减小侧向热流的流入和影响。但通过有限元模拟分析计算，降低温差并不会明显测量误差，这是因为尽管降低了温差，减小了侧向流入试样中心区域的热量，但温差减小的同时也会带来加热功率的减小，这使得测量流入的热量在总加热功率中所占的比例并没有降低，甚至有时候还会有所增加。因此降低试样与冷板之间的温差并不会改善试样表面发射率的测量精度。

5. 结论

通过以上对保护热板法热导率测定仪测量材料表面半球向发射率的测试模型有限元模拟分析，可以得到以下结论：

(1) 由于在试样的外围表面覆盖了一层反射膜，使得试样整体表面的发射率不一致，造成了试样在热平衡状态下的温度分布不均与，即试样内部并不是护热板法热导率测试规定的一维热流。通常在测试中会出现试样四周温度要高于试样中心区域温度，这就造成试样中心区域的热量不仅仅有加热板输入的热量，还会有试样四周由高温处流入的热量。如果仅仅通过加热板电加热功率来测量和计算试样表面发射率，这就会忽略掉侧向流入热流的影响，从而给测量带来会有很大的误差。由于是原理性的问题，所以采用护热板法测量半球向全发射率误差大，这点也可以从依阳公司应用技术资料“稳态保护热板法热导率测试技术应用——Application Note: 001；采用保护热板法导热系数测定仪测量材料半球向全发射率”中得到验证，文中所列的英国国家物理实验室采用这种方法所测试的试验数据误差非常大，测试结果的波动性也很大。因此，无论从理论上，还是从试验测试上，基本都证明了稳态保护热板法热导率测试装置直接测量材料表面半球向发射率都存在很大的原理性误差，而且还无法进行任何修正。

(2) 尽管理论计算和试验测试都证明了采用保护热板法热导率测量装置不适合直接测量试样表面的半球向全发射率，主要原因是由于试样平面内侧向和中心区域温度分布不均匀。但通过有限元模拟分析发现，尽管试样平面内温度分布不均匀，但在试样的中心区域内还是可以达到一维热流的要求。只要能测量出流经试样中心区域的热流密度，还是可以很准确的测量出试样的发射率。

(3) 鉴于直接采用保护热板法热导率常测试方法直接测量发射率具有较大的误差，可以采用热导率测试中的热流计法，将薄膜热流传感器放置在试样和加热板之间直接测量试样中心区域的热流密度。这样可以大大的改善测量精度，使得稳态热导率测试方法可以正常的在试样表面半球向全发射率测量中应用。