

稳态保护热板法热导率测试技术应用——Application Note: 002

护热板法导热系数测定仪测量材料 半球向全发射率原理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和测量装置基础上建立了相应的半球向全发射率原理模型，并对半球向全发射率的原理模型进行了有限元模拟分析计算，优化和确定出了有限元计算参数和试验参数，从理论上证明了这种方法的有效性和准确性，并得出了一些实际测量中需要特别关注的结论，为进一步实际测试模型的有限元分析计算提供了参考。

1. 简介

材料的热辐射性能，特别是材料的半球向全发射率这个热辐射性能参数在各种热计算中都是一个重要的参数，相应的测试方法也很多，但绝大多数半球向发射率测量方法都是基于小试样的取样形式进行测量，对于工程材料大试样结构或复合结构材料的发射率测量则显著有效的方法不多。

热辐射性能的测量基本都是基于辐射传热条件下进行，而采用经典的具有间隙的两平板之间辐射传热模型就可以很好的解决工程材料的热辐射性能测试评价。采用间隙平板的这种测试技术早在文献[1,2]中应用过，在 ISO 8302 标准测试方法中进行了描述，在对应的中国国家标准中，GB/T 10294-2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定——防护热板法在第 2.4.6 条“装置工作面的热辐射率”是如下规定的：

若在热板和冷板之间建立一个厚度 d 在 $5\text{ mm} \sim 30\text{ mm}$ 的空气层（防止发生自然对流），单位温度差的热流密度 h_t ，是 λ/d 与 $4\sigma_n T_m^3(2\varepsilon-1)$ 的和（ λ 是空气的导热系数， σ_n 是斯蒂芬-波尔斯曼常数）。对 $h_t \propto 1/d$ 的图进行最佳拟合可得到空气导热系数 λ 和 $4\sigma_n T_m^3(2\varepsilon-1)$ ，进而求出装置的面板的辐射率。当自然对流不能避免时，则要求更复杂的程序。

由此可见，采用稳态保护热板法热导率测量装置就可以形成测量材料半球向全发射率的测试条件。本文采用了有限元分析技术对这种测试方法的原理模型进行了计算验证，优化和确定出相应的计算参数和试验参数，从理论上证明了这种方法的有效性和准确性。

2. 发射率测量原理

假设被测试样和冷板的表面都是满散射反射表面和发射表面，同时它们的热辐射性能并不随波长发生变化，即假设试样和冷板表面是灰体。对于两个无限平板之间的净辐射热传递量 Q ，可以表达为：

$$Q = A\sigma(T_{hot}^4 - T_{cold}^4) \left/ \left(\frac{1}{\varepsilon_{hot}} + \frac{1}{\varepsilon_{cold}} - 1 \right) \right. \quad (2.1.1)$$

式中： T_{hot} 为试样表面温度， T_{cold} 为冷板温度、 ε_{hot} 为试样表面半球向全发射率， ε_{cold} 为冷板表面半球向全发射率， A 为中心计量单元面积以及 σ 为波尔斯曼常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

对公式(2.1.1)进行变换得到被测试样表面半球向全发射率的表达式：

$$\varepsilon_{hot} = \left(\frac{A\sigma(T_{hot}^4 - T_{cold}^4)}{Q} - \frac{1}{\varepsilon_{cold}} + 1 \right)^{-1} \quad (2.1.2)$$

由此，通过试样输入给中心计量单元的电功率、试样和冷板的表面温度以及中心计量单元面积，结合已知的冷板表面半球向全发射率就可以获得被测试样的半球向全发射率。

3. 发射率测试原理模型的验证

3.1. 测试原理模型

在采用有限元对发射率测试进行模拟分析之前，先对典型两平板之间热辐射模型进行了有限元分析验证，以确定有限元分析的相关参数设置和计算误差范围。

根据保护热板法发射率测量原理，可以确定最简单的验证模型就是两个平板之间的热辐射模型，由此所建立的有限元模拟计算验证模型如图 3-1 所示。

模型中的试样采用实际测试中的正方形试样尺寸 $300 \times 300 \times 20\text{ mm}$ ，同时，为了便于观测计算结果，

正方形试样由两个矩形拼接而成，通过中间的连接线可以很容易的观测和提取有限元计算结果在连接上的分布。同样，与被测试样发生辐射热交换的冷板也同样如此处理，试样与冷板之间保持几毫米的距离。

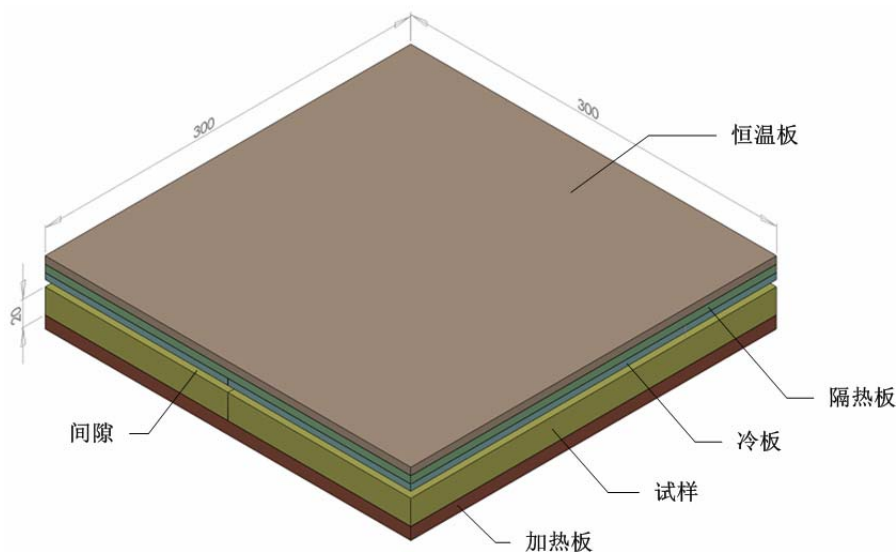


图 3-1 发射率的有限元模拟计算验证模型

加热板、隔热板和恒温板都为 $300 \times 300\text{mm}$ 的正方形，通过在加热板和恒温板加载热量和温度，使得加热板和恒温板上形成不同大小的恒定温度和温度差，使得试样和冷板表面具有产生热辐射的温度差。

在图 3-1 所示的验证模型中，只有试样和冷板表面存在辐射形式的热交换，由此来模拟真空条件下的辐射传热情况。同时，验证模型中的其他外侧表面都设置为绝热边界条件，这样就能完全满足公式(2.1.1)所要求的边界条件。

3.2. 热物性参数设定

为了便于采用有限元进行模拟计算，根据实际材料的热导率情况，假定了三种不同热导率范围的材料作为被测试样，它们的热导率随温度变化曲线和数据如图 3-2 所示。其中，超低热导率材料的热导率变化范围为 $0.005\sim 0.015\text{ W/mK}$ ；低热导率材料的变化范围为 $0.02\sim 0.06\text{ W/mK}$ ，是超低热导率材料的 4 倍；高热导率材料的变化范围为 $0.8\sim 2.4\text{ W/mK}$ ，是超低热导率材料的 40 倍。通过这种设定，基本上覆盖了各种隔热材料热导率的变化范围。由于绝热材料比热容和密度随温度变化不大，所以模拟计算中设定它们为常数，三种材料的比热容都为 1000 J/kgK ，密度都为 300 kg/m^3 。

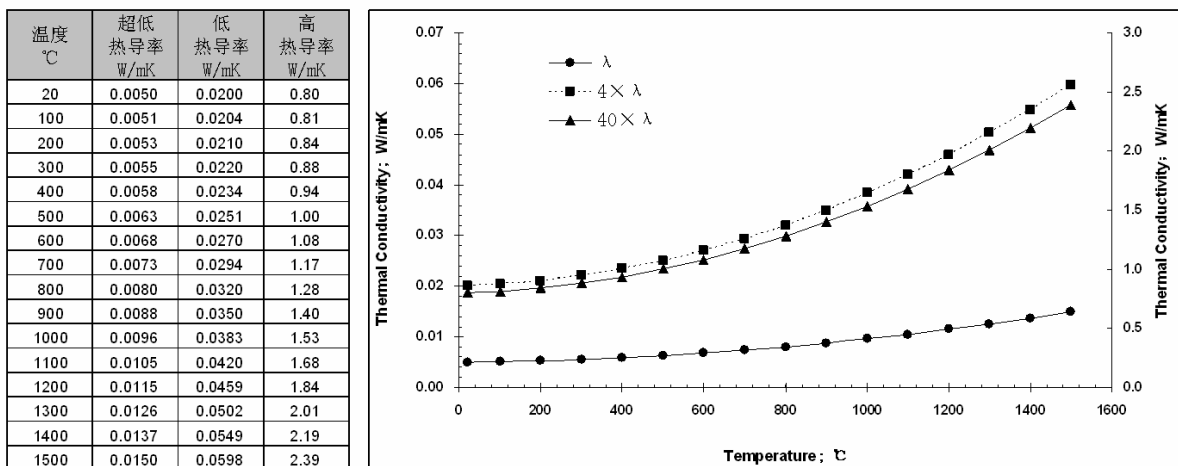


图 3-2 三种不同材料热导率随温度变化范围

以上三种不同的隔热材料主要是用高温条件下热物性测试的有限元分析，而对于本文所涉及的温度不高的材料（如建筑隔热材料）的半球向全发射率测量，基本不用到这三种材料，而是采用有限元分析软件

中提供的 ABS 塑料，以上三种材料的热导率变化范围只是作为一个量级参考，在具体计算中根据这三个热导率量级来设定 ABS 塑料的热导率，从而简化计算过程。由于在测试过程中温度变化区间很小，所以假设所有材料的性能参数不随温度发生变化。

冷板材料为铝板，热导率约为 200 W/mK 左右，冷板表面采用黑漆涂敷，设定黑漆的半球向全发射率为 0.98，也不随冷板温度发生改变。

3.3. 有限元验证计算结果和分析

3.3.1. 有限元网格大小的确定

为了验证有限元模拟计算的有效性，我们首先选择了 3mm 的间隙厚度来进行计算。网格参数选择“标准网格”使得试样和冷板上网格划分均匀对称以便于采集相同位置的数据进行发射率计算。网格大小的选择是网络越小计算精度越高，初步选择网格整体大小为 20mm，公差为 1mm。

计算中隔热板和试样材料都设定为有限元软件提供的 ABS 塑料，其热导率为 0.22 W/mK 。同时设定冷板表面的发射率为 0.98，试样表面的发射率为 0.95，加载到加热板上的加热功率为 8W，恒温板温度恒定在 0°C ，这时的计算结果如图 3-3 所示。从模拟计算结果可以看出，计算结果要远大于发射率 0.95 甚至超过 1，平均偏差百分比为 16% 左右。

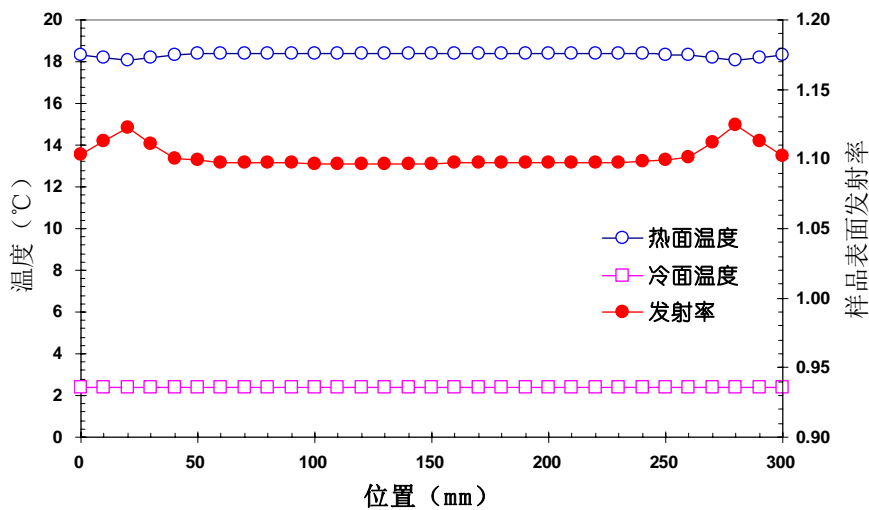


图 3-3 间隔 3mm 发射率 0.95 时的验证计算结果

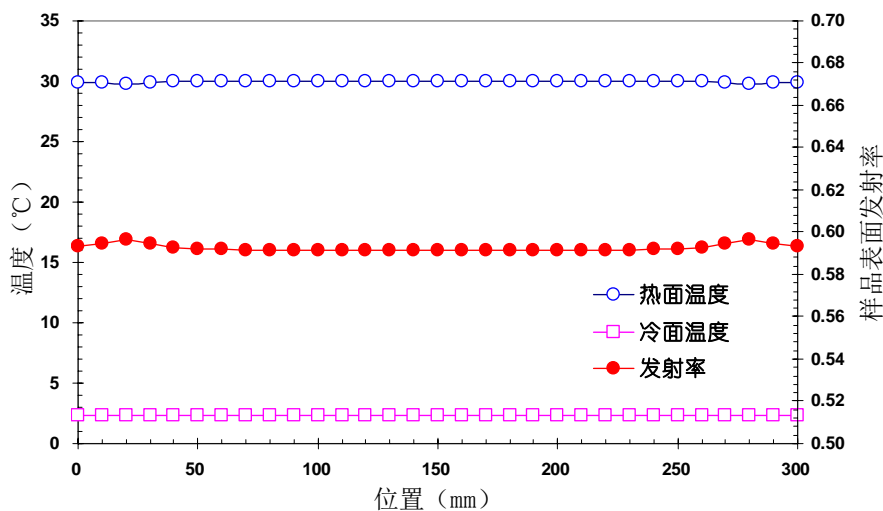


图 3-4 间隔 3mm 发射率 0.55 时的验证计算结果

将样品表面发射率降低到 0.55 后重新进行计算，计算结果如图 3-4 所示。从模拟计算结果可以看出，计算结果还是大于发射率 0.55，平均偏差百分比为 7.73% 左右。

造成这种有限元模拟计算误差较大的原因，可能是网格划分中所选择的网格太大而造成。进一步缩小网格整体大小为 10mm，公差 0.5mm，这已经是最大计算能力下的最小网格尺寸，计算过程中的大量时间是用于辐射视角因数计算，约用时半个小时，总耗时约一个多小时，计算结果如图 3-5 所示。

从图 3-5 所示的计算结果可以看出，模拟计算结果的精度得到了很大提高，与所设定的发射率 0.95 相比，平均偏差百分比约为 1.9% 左右，但总的模拟计算时间太长。

为了即要保证模拟计算的精度，又要缩短计算时间，进一步改变网格的大小，设定为网格整体大小为 15mm，公差保持 0.5mm，此时的辐射视角因数计算时间缩短到 5 分钟，总耗时减少到 7 分多钟，计算结果如图 3-6 所示。

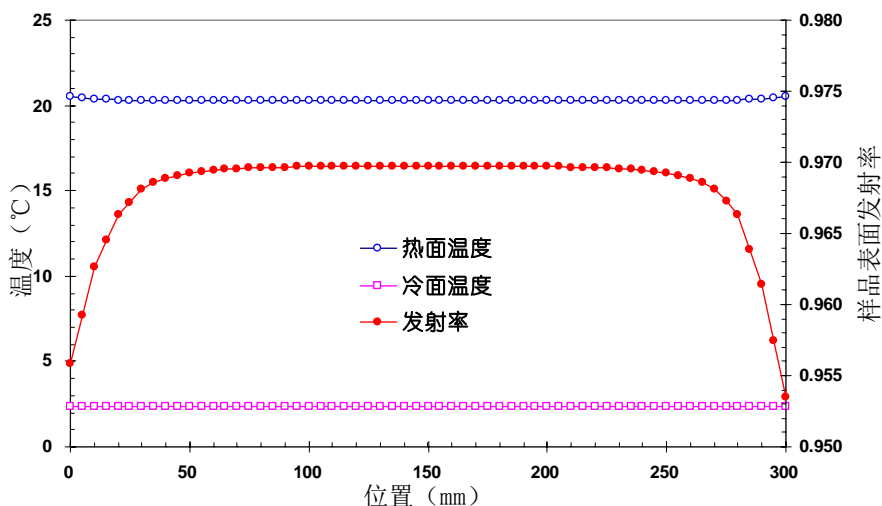


图 3-5 网格大小 10mm，公差 0.5mm 时对间隔 3mm 发射率为 0.95 的模拟计算结果

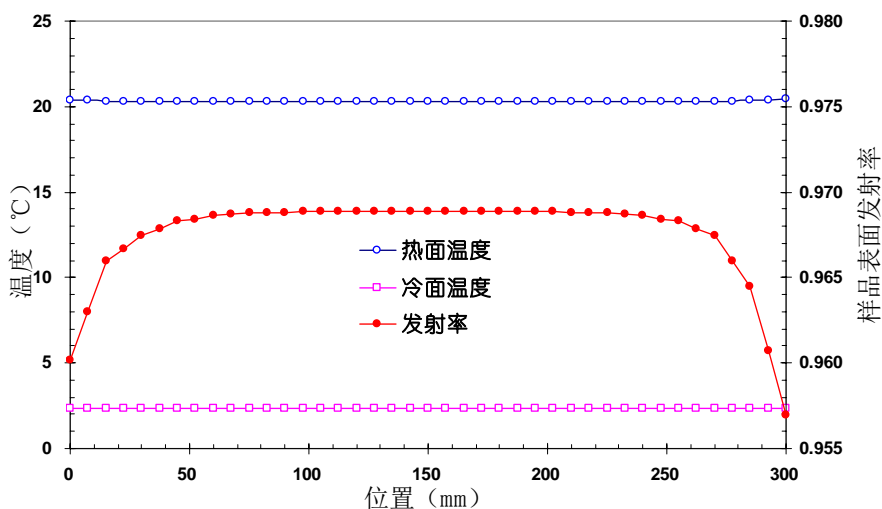


图 3-6 网格大小 15mm，公差 0.5mm 时对间隔 3mm 发射率为 0.95 的模拟计算结果

从图 3-6 所示的计算结果可以看出，15mm 的网格整体大小并没有损失计算精度，与所设定的发射率 0.95 相比，平均偏差百分比约为 1.84%，但总的模拟计算时间大大缩短为 7 分多钟。

通过以上分析计算，在网格划分中所确定的整体网格大小为 15mm，公差为 0.5mm。

3.3.2. 不同发射率时的模拟计算结果

在确定网格划分的大小后，采用整体网格大小为 15mm，公差为 0.5mm 来模拟计算试样表面不同发射率时的模拟计算精度。

模拟计算中，试样表面的发射率从 0.95 以 0.05 的间隔变化到 0.05，同时还保持上述的其他设定参数，冷板表面发射率为 0.98，加载到加热板上的加热功率为 8W，恒温板温度恒定在 0℃。由此经过有限元模拟计算获得的结果以及发射率设定值与计算值之间的偏差百分比如图 3-7 所示。

从图 3-7 所示的计算结果可以得到以下结论：

- 随着试样表面发射率的逐渐增大，计算误差也随之增大，但最大偏差也不会超过 2%。
- 在恒定加热功率和恒温板温度保持不变的情况下，试样表面发射率如何变化，冷板的温度始终保持不变，而试样表面温度则随着发射率的增大而降低，即随着发射率数值的增大，试样表面与冷板之间的温差逐渐减小。
- 试样表面发射率增大而计算误差随之增大的现象也与测试中的情况温和，这是因为表面温度传感器具有固定的测量不确定度，发射率增大使得温度传感器测量不确定度在冷热面温差中所占的比重增大，势必会增大测量误差。

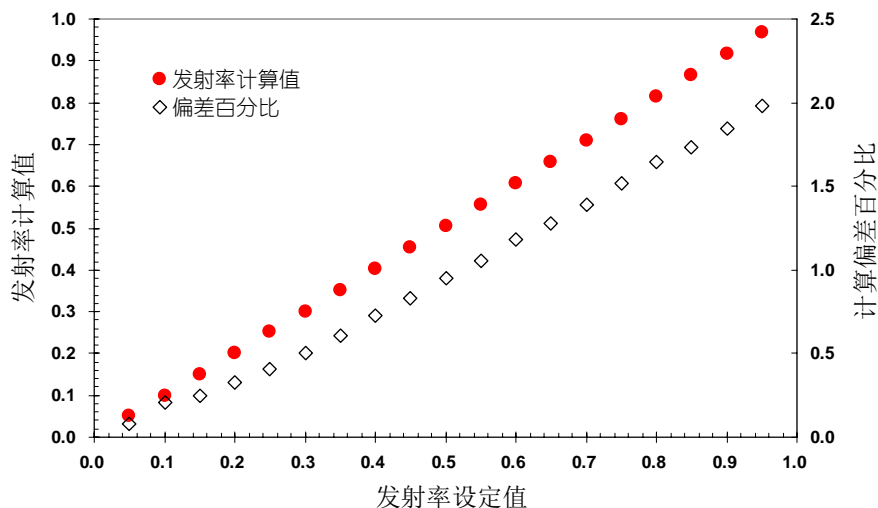


图 3-7 不同发射率设定值时的有限元模拟计算结果和误差

3.3.3. 不同间隔高度的模拟计算结果

还是采用整体网格大小为 15mm，公差为 0.5mm 来模拟计算试样表面与冷板之间不同缝隙高度时的模拟计算精度。

模拟计算中，试样表面的发射率设定为 0.55，缝隙高度从 3mm 以 5mm 的间距变化到 30mm，同时还保持上述的其他设定参数，冷板表面发射率为 0.98，加载到加热板上的加热功率为 8W，恒温板温度恒定在 0℃。由此经过有限元模拟计算获得的结果以及与发射率设定值之间的偏差，如图 3-8 所示。

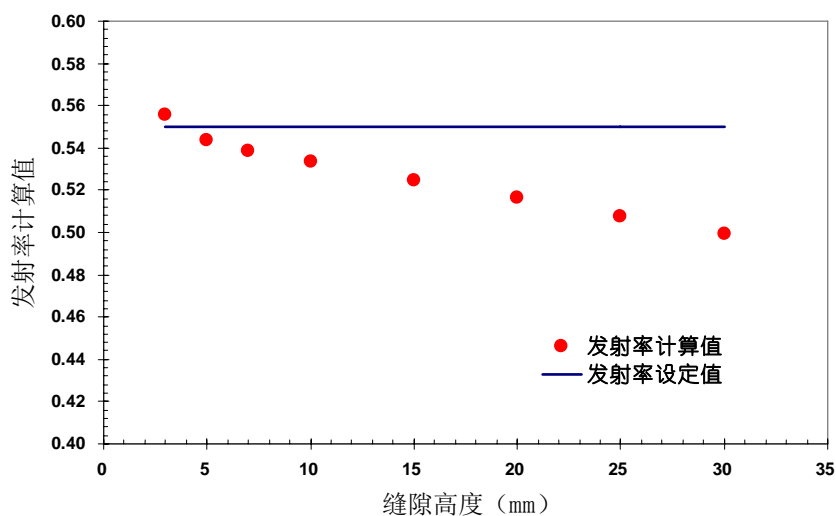


图 3-8 不同间隔高度发射率 0.55 时的有限元模拟计算结果

从图 3-8 所示的计算结果可以得到以下结论：

- 随着试样表面与冷板之间的间隙高度增大，发射率计算值逐渐变小，与发射率 0.55 的设定值偏离

越来越大。造成这种现象的原因是随着间隔高度的增加，试样表面和冷板之间的四周侧面面积也随之增大，有一部分热辐射会产生在这些辐射面上产生，同时试样表面的温度分布也越来越不均匀，如错误！未找到引用源。所示。

- 在有限元模拟计算中间隙的最佳高度是 5mm 至 7mm，而实际试验测试中，这个最小间隙高度可以降低到 3mm。如果是 3mm 的间隙高度，间隙四周的侧面面积是整个试样表面积的 4%，因此这种四周侧向的热辐射可以忽略不计。

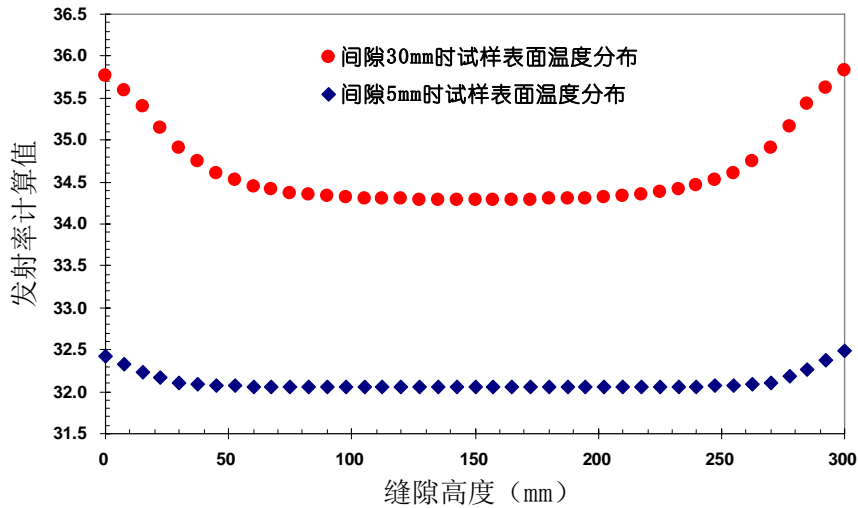


图 3-9 间隙分别为 5mm 和 30mm 时试样表面的温度分布 (试样表面发射率为 0.55)

3.3.4. 不同温度差时的模拟计算结果

以上是在恒温板温度设定为 0℃ 时的模拟计算结果。从计算结果可以得知，在恒温板温度恒定和加载功率也恒定的情况下，试样表面发射率越小，试样表面与冷板之间的温差就越大；而间隔高度越大，试样表面与冷板之间的温差也会随之增大。因此，选择间隔高度为 5mm，试样表面发射率为 0.55，改变恒温板的温度从 -5℃ 到 20℃ 间隔 5℃ 来进行模拟计算，以考察冷板温度变化对测量结果的影响规律，模拟计算结果如图 3-10 所示，相应的试样和冷板表面上的温度以及两者之间的温差变化如图 3-11 所示。

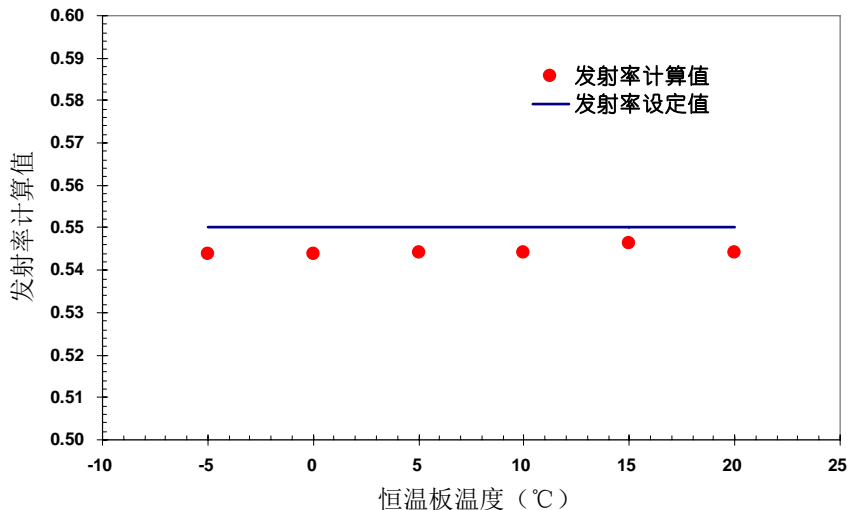


图 3-10 不同恒温板温度发射率 0.55 时的有限元模拟计算结果

从图 3-10 所示的计算结果中可以看出，恒温板温度的改变，对样品表面发射率基本没有影响，发射率计算结果比发射率设定值偏低也是由于有限元计算误差造成。

同时需要注意的是，如何加热功率不变的情况下，随着恒温板温度的增加，但温差会随之减小。这种温差减小尽管对发射率计算没有影响，但在试验测试中由于温度传感器的不确定度因素，温差减小会使得

温度测量的不确定度在温差测量中所占的比重增大而增大测量误差。因此，在实际发射率测试试验过程中，要尽可能的去降低冷板温度以增大试样和冷板之间的温差。

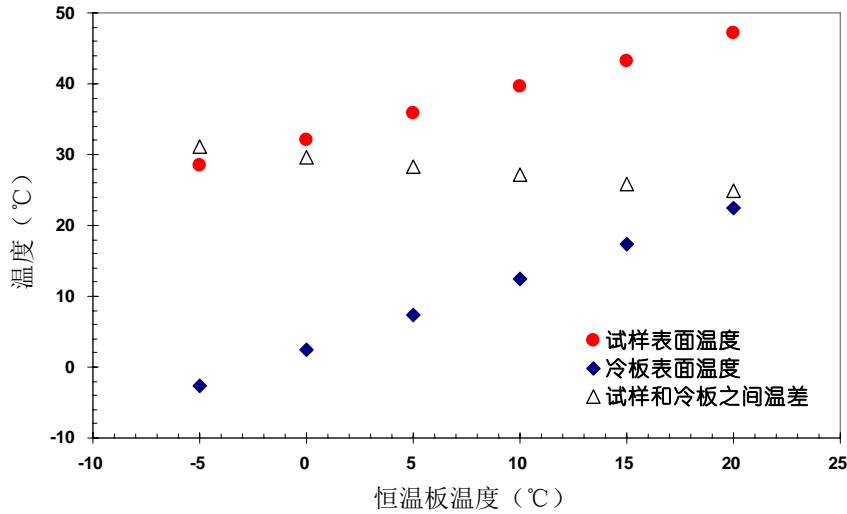


图 3-11 不同恒温板温度发射率 0.55 时的试样和冷板表面温度以及两者之间的温差

3.4. 不同试样热导率时的模拟计算

根据上述计算结果所确定的计算参数和试验参数，对不同热导率试样表面的发射率测试进行有限元模拟计算，以获得试样热导率对发射率测量精度的影响。

在以上有限元计算中，隔热板为有限元软件提供的 ABS 塑料，其热导率为 0.22 W/mK 保持不变。同时设定冷板表面的发射率为 0.98，试样表面的发射率从 0.1 变化到 0.95，恒温板温度恒定在 0°C ，整体网格大小为 15mm，公差为 0.5mm，试样与冷板之间的间隙为 5mm。

为了考核材料热导率对测量结果的影响，在这部分的计算中则将改变被测试样的热导率，分别设定厚度为 20mm 的 ABS 塑料的热导率分别为 0.22 W/mK 、 0.022 W/mK 和 0.005 W/mK 以代表不同隔热材料热阻特征的材料。另外，将原来加载在加热板上的 8W 恒定功率修改为加热板为 60°C 恒定温度，这样更符合实际测试试样中的情况。不同导热材料时模拟出计算不同发射率下冷热面温度和温差变化结果，如图 3-12、图 3-13 和图 3-14 所示。

从模拟计算获得的结果可以看出，仅仅通过模拟计算可以得到很高精度的发射率计算结果，所有发射率计算结果与发射率设定相差百分比都不超过 0.5%，证明原理模型和发射率计算公式是正确的。

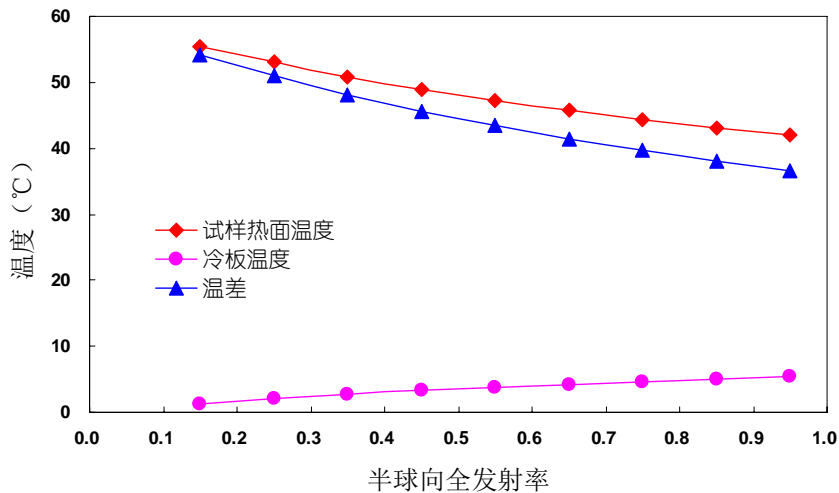
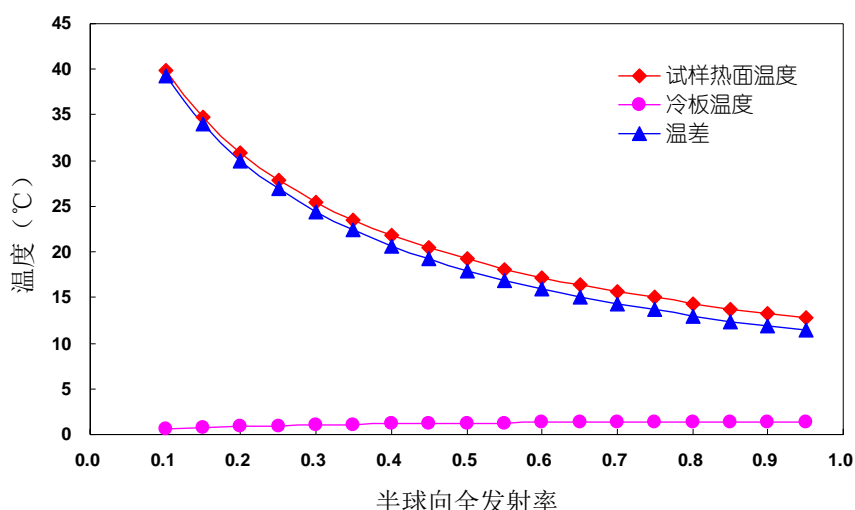
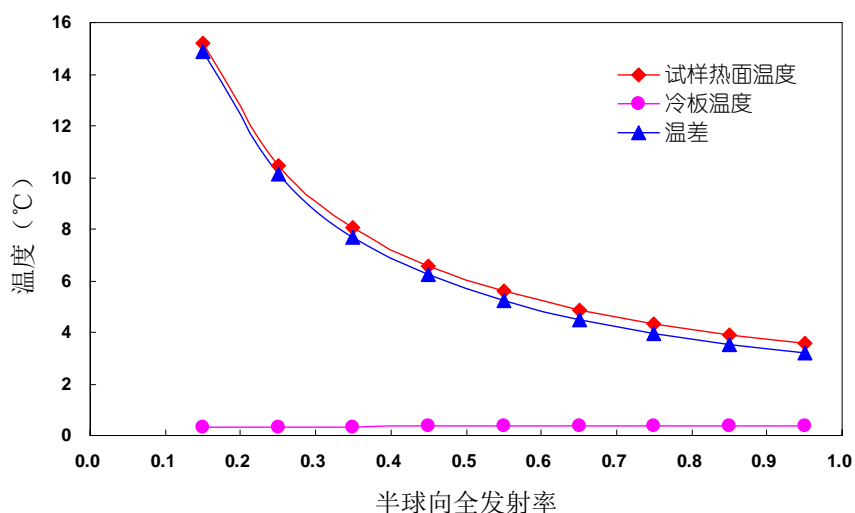


图 3-12 试样热导率为 $0.22 W/mK$ 时模拟出计算不同发射率下冷热面温度和温差变化图 3-13 试样热导率为 $0.022 W/mK$ 时模拟出计算不同发射率下冷热面温度和温差变化图 3-14 试样热导率为 $0.005 W/mK$ 时模拟出计算不同发射率下冷热面温度和温差变化

对于以上不同热导率试样模拟计算结果还可以明显的看出，随着试样热导率的降低，试样表面和冷板表面的温差明显的减小，在热导率为 $0.022 W/mK$ 和热导率为 $0.005 W/mK$ 的低导热和超低导热试样中，这种现象非常突出。例如对于热导率为 $0.005 W/mK$ 的超低热导率试样，在整个发射率区间内最大温差也不超过 $15^{\circ}C$ ，在试样表面发射率 0.5 至 0.95 的范围内，最大温差只有 $5.5^{\circ}C$ 。在实际试验测试中，采用热电偶温度传感器测量这个温差会带来很大的误差。由此可以看出，这种采用保护热板法热导率测试仪器测量低导热或超低导热材料（如真空隔热板等）的表面发射率会存在较大的误差，减小测量误差的方法不外乎是提高加热板的温度和降低冷板温度，但这在大多数已经定型的保护热板法热导率测试设备上较难实现。

为了提高超低导热材料表面发射率的测量精度，即增大试样表面和冷板表面之间的温度差，可以假设加热板温度为 $100^{\circ}C$ ，恒温板温度为 $-20^{\circ}C$ ，这种假设在有些保护热板法热导率测试设备上不难实现。

在此项有限元计算中，隔热板为有限元软件提供的 ABS 塑料，其热导率为 $0.22 W/mK$ 保持不变。同时设定冷板表面的发射率为 0.98，试样厚度为 20mm，试样热导率为 $0.005 W/mK$ ，试样表面的发射率从 0.1 变化到 0.95。加热板加载 $60^{\circ}C$ 恒定温度，恒温板温度恒定在 $-20^{\circ}C$ ，整体网格大小为 15mm，公差为 0.5mm，试样与冷板之间的间隙为 5mm。由此得到此种超低热导率材料不同发射率下冷热面温度和温差变化结果，如图 3-15 所示。

将热导率为 0.005 W/mK 试样在改变加热板和恒温板温度前后的计算结果放在一起进行对比，如图 3-16 所示。

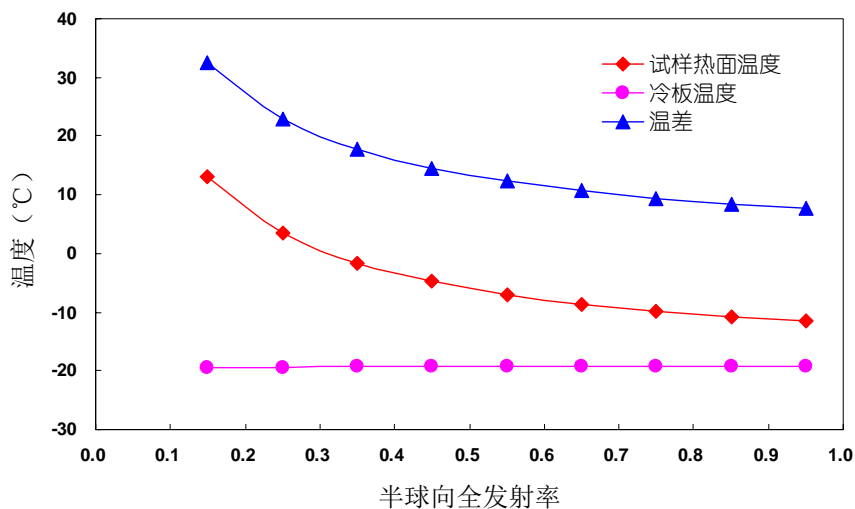


图 3-15 增大温差后试样热导率为 0.005 W/mK 时模拟出计算不同发射率下冷热面温度和温差变化

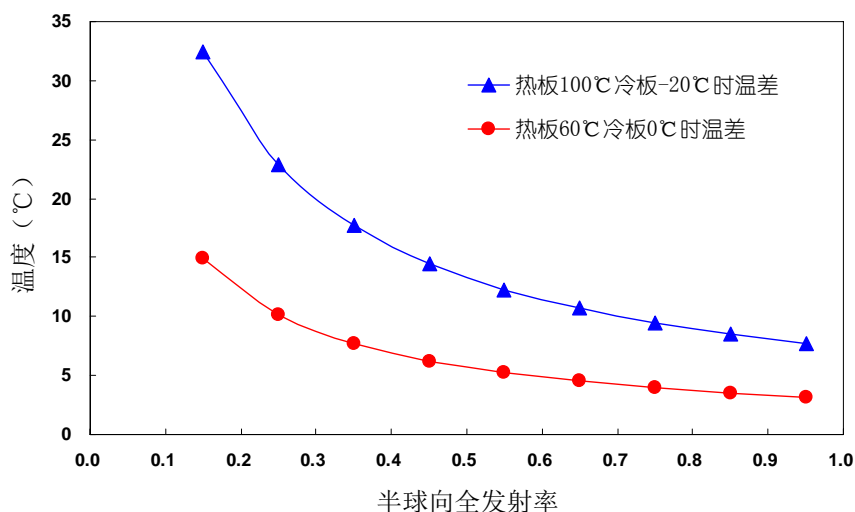


图 3-16 增大温差前后试样热导率为 0.005 W/mK 时不同发射率下试样表面和冷板表面温差变化

从图 3-15 和图 3-16 所示的增大加热板温度和降低恒温板温度后的计算结果可以看出，加热板温度从 60°C 增大到 100°C ，恒温板温度从 0°C 降低到 -20°C ，起始温差从 60°C 增大到了 120°C ，基本增大了倍。对于超低热导率 0.005 W/mK 的试样，模拟计算结果也显示出试样表面和冷板之间的温差也增大了两倍多，但对于发射率大于 0.6 以上时，温差还是在 10°C 以内，还是会在实际测量带来测量误差。

由此，对于超低导热材料表面半球向全发射率的测量，还是要尽可能的增大加热板的温度和降低恒温板的温度，尽可能使得试样表面与冷板之间的温差变大，才能保证热电偶温度传感器测量误差对整个发射率测量误差的影响不大。

4. 结论

通过以上原理模型的有限元计算分析，可以获得以下结果：

- 所确定的有限元计算中比较合适的网格划分参数为整体网格大小为 15mm ，公差为 0.5mm ，试样与冷板之间的间隙为 5mm 。
- 这种在护热板法测量装置上测量半球向发射率的测试方法，对发射率小的材料进行测试更有优

势，测量精度更高。

- 为了保证测量精度，要尽可能降低冷板温度和提高加热板温度，以增大试样和冷板之间的温差，由此来降低温度传感器测量误差对发射率测量的影响。对于低导热被测试样表面的发射率测量，尤其要设法增大温差。

5. 参考文献

[1] Hager, N. E., Jr., "Methods for Measuring Total Hemispheric Emissivity of Plane Surfaces with Conventional Thermal Conductivity Apparatus," Proceedings of the 7th Conference on Thermal Conductivity, Gaithersburg, MD, November 13-16, 1967, pp. 241-246.

[2] Jaouen, J-L. and Klarsfeld, S., "Heat Transfer Through a Still Air Layer," Thermal Insulation, Materials and Systems, ASTM STP 922, Powell and Matthews Eds., Dallas, TX, 1984, pp. 283-294.