

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



摘要：介绍了稳态保护热板法导热系数测试仪器用于材料半球向全发射率测试的原理和方法，并介绍了英国国家物理实验室采用真空型保护热板法导热系数测试设备对有机玻璃、带涂层玻璃和反射隔热产品的半球向全发射率进行的测量工作，测量结果与光谱法测量结果进行了对比，证明保护热板法测试材料半球向全发射率的测量精度能够满足大多数建筑材料的使用要求，是一种比热箱法更快捷测试费用低的替换和补充方法。

1. 简介

随着建筑节能技术的发展出现了越来越多的新型保温隔热类建筑材料，评价这些保温隔热材料的主要性能指标是导热系数和半球向全发射率，用于评估和计算材料的隔热性能。

保温隔热材料的导热系数测试评价基本上都是采用稳态保护热板法测试技术，对于半球向全发射率的测量则一般采用光谱法测量一定光谱范围内的法向发射率并通过复杂计算转换成工程上所用的半球向全发射率。对于建筑类材料来说，光谱法测量中所取的试样太小很难具有广泛的代表性，而测试导热系数的保护热板法则可以同时测量半球向全发射率，同时试样尺寸可以较大而具有代表性。

保护热板法测量半球向全发射率技术是通过测量试样表面与一个已知发射率冷板表面之间的净热辐射交换来获得被测试样表面的半球向全发射率。这种测试技术早在文献[1,2]中应用过，在加热器的下方使用了空气隙以减小热对流，这项技术通常用于测量具有较高发射率的加热板材料，并且在 ISO 8302 标准测试方法中进行了描述，同时采用不同厚度的空气隙来进行测试可以避免空气导热的修正。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_c ，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-波尔兹曼常数）。对 $h_c \propto 1/d$ 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。

建筑材料隔热的重要手段是使得建筑材料表面的发射率越低越好，如果采用此技术对发射率较低的材料进行测试，辐射热流密度则会小于通过空气传导的空气热传导热流密度，但如果采用具有真空环境中保护热板法热导率测量装置，真空环境中就可以消除小空气热传导的影响。对于表面粗糙且各向异性的建筑材料，这种方法可以测试一个尺寸更大更均有代表性的被测试样，与采用光谱仪测试较小试样发射率相比，更体现出明显的优势。

本文将对这种采用保护热板法的半球向全波长发射率测试方法进行了详细的介绍，并介绍英国国家物理实验室（NPL）采用此方法对一些典型材料所进行的测试。

2. 保护热板法发射率测量原理

对于一个单试样结构的保护热板法导热系数测量装置，假设它的结构是冷板在顶部，保护热板和中心计量单元在底部，试样被夹持在中央。

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：

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

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 为波尔兹曼常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

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：

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

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. 发射率测量的结构

通过测量被加热试样表面与冷板之间空气隙内的辐射传热来测量试样表面有效发射率，其中冷板表面喷涂了一种于热板表面相同的黑漆，黑漆的发射率在 20℃ 时为 0.90，这个数据可以通过光谱发射率测试仪器或其它测试方法准确获得。

为了抑制空气隙内的热传导和热对流而只存在辐射形式的热传递，整个护热板法导热系数测量装置需要放置在真空腔内。对于 3mm 厚度的空气隙，如果要在此空气隙内消除掉气体热传导，真空腔内的气压就要小于 0.01Pa。如果这个级别的真空度能够实现，则间隙两侧之间的辐射热传递热量就等于施加在热板计量单元上的电功率，但前提是侧向和边缘护热能使得净侧向散热达到最小。

在热板计量单元的四个边角处放置四个小的塑料间隔器以在试样和冷板之间形成一个固定高度的间隙。通过这个很小的间隙并同时采用一个反射铝箔覆盖护热单元边缘，这样就可以使得在计量单元面积内的试样发射到边缘护热单元上的净热辐射可以减少到忽略不计的程度。

通过嵌入凹槽内的热电偶来测量冷板温度，热电偶需要在喷涂前按照完毕。采用细丝热电偶测量试样表面温度，并选择与试样发射率近似的胶带并用胶带将热电偶粘贴在试样表面，由此来保证热电偶与试样有良好的热接触。

4. 试验测试和对比

采用真空型的保护热板法导热系数测试系统，英国国家物理实验室对一些典型材料进行了半球向全发射率测量，测量结果与光谱法测量结果进行了对比。

为了验证这种保护热板法半球向全发射率测量的有效性，对有机玻璃和一种带涂层的玻璃材料进行了测量，并对同样材料采用 NPL 光辐射测量部门的光谱测试进行了比对测量。光谱测试仪器通过分别测量黑体和试样的法向热辐射能量并进行对比，由此可以计算出被测试样的光谱发射率。通过对整个热红外波段光谱发射率的了解，可以计算出近法向的全发射率。这种光谱测量方法需要较小的试样，但并不适合各项异性材料或热容比较小的材料，并且这种方法对于高反射材料的测试存在很大的误差。

为了将护热板法测试结果与光谱仪器测试的近法向发射率进行比较，近法向发射率需要转换成半球向全发射率，如果已知这两个表面的发射和反射特性，并进行复杂的计算，可以达到很高的转换精度。然而，为了进行这项比较，选择了欧盟标准 EN 673:1998 “建筑玻璃——热传输性能（U 值）的确定——算法”中的发射率“修正”表，这个修正可以提供足够精度的转换因子。

4.1. 有机玻璃的发射率测量比对

对于一个有机玻璃热导率标准参考材料制成的试样，采用光谱测量技术进行了近法向发射率的测量，并将测量结果转换成半球向全发射率，然后与保护热板法半球向全发射率测量结果进行对比，如表 4-1 所示。

表 4-1 有机玻璃半球向全发射率测试结果对比

试样表面温度/℃	保护热板法半球向全发射率测量结果	光谱仪测试并转换后的半球向全发射率结果	两种测量结果的偏差
-24.7	0.949	0.896	0.054
-6.7	0.917	0.897	0.021
12.6	0.939	0.898	0.041
22.3	0.951	0.898	0.052
32.8	0.974	0.899	0.075

在保护热板法测试中，试样的表面温度与冷板表面温度相差 12K~15K。

4.1.1. 带涂层玻璃的发射率测量对比

在玻璃样品表面涂敷一层具有较低近法向全发射率的掺杂氟原子的二氧化锡涂层，然后采用光谱仪器进行测量，测量结果然后转换成半球向全发射率，并与护热板法测量结果进行比较，如表 4-2 所示。

表 4-2 有机玻璃半球向全发射率测试结果对比

试样表面温度/℃	保护热板法半球向全发射率测量结果	光谱仪测试并转换后的半球向全发射率结果	两种测量结果的偏差
-19.2	0.208	0.167	0.041
1.3	0.187	0.169	0.018
21.4	0.180	0.171	0.009
21.8	0.184	0.171	0.013
43.9	0.201	0.173	0.027
63.5	0.208	0.175	0.032

在保护热板法测试中，试样表面温度与冷板表面温度相差 20K~25K。

4.1.2. 覆铝反射绝热材料发射率测试对比

最近在建筑行业出现了一种“反射绝热”产品并已在空心墙壁材料上得到应有以替代传统的隔热材料，这种反射绝热材料的原理是降低辐射热传递，而辐射传热则是空心墙热传递的主要重要组成部分。气泡铝膜外包材料，包含了一层塑料和空气腔，标称厚度 5mm 到 10mm，在一个面或两个面上都有铝反射膜。单铝膜产品用钉子固定在空心墙内的插板上，而双层铝膜产品则悬挂在空心墙内部中间位置。

这些产品的性能可以采用热箱法进行热传输性能评价，但热箱法既耗时费用又昂贵，而保护热板法则提供了一种更经济和更直接的手段来同时评价发射率和热阻。同时，采用保护热板法还可以研究包裹这些产品的部件性能，如保护反射铝膜的塑料膜，这层覆盖塑料对反射铝膜起到防止污物、灰尘和锈蚀的作用。

采用光谱仪器对这种反射铝膜绝热材料样品进行了近法向全发射率测量，并转换为半球向全发射率，并与保护热板法测量结果进行比对，如表 4-3 所示。

表 4-3 铝膜反射隔热材料半球向全发射率测试结果对比

试样表面温度/℃	保护热板法半球向全发射率测量结果	光谱仪测试并转换后的半球向全发射率结果	两种测量结果的偏差
-1.0	0.040	0.073	-0.033
20.2	0.038	0.074	-0.036

在保护热板法测试中，试样的表面温度与冷板表面温度相差 20K。

4.2. 讨论

如果以光谱法测量获得的测试数据为准确结果的化，那么采用保护热板法的半球向全发射率测试精度则满足绝大多数建筑材料对测试精度的要求。从以上对比结果可以看出，保护热板法的测量结果要大于光谱法测量结果，如果采取进一步的细化措施还可以更进一步的提高保护热板法的测量精度，这样在非均质大尺寸材料的发射率测量中，保护热板法就可以完全成为一种替代光谱法的合适测试方法。

在整个测量结果不确定度中，温度差和热流密度的测量是两个有重要影响的不确定度分量，而冷板表面的已知发射率只要保持稳定则对总的测量不确定度影响很小。在表 4-4 和表 4-5 中分别给出了高发射率样品和低发射率样品测试中测量参数不确定度分量的评估。

表 4-4 高发射率 (0.95) 测试中各个测量参数对发射率测量不确定度的影响评估

测量参数	评估的不确定	在发射率值中的影响	对发射率不确定的影响百分比
温度	0.5K	0.047	4.9
热流密度	2%	0.021	2.2
冷板发射率	0.005	0.006	0.6

表 4-5 低发射率 (0.18) 测试中各个测量参数对发射率测量不确定度的影响评估

测量参数	评估的不确定	在发射率值中的影响	对发射率不确定的影响百分比
温度	0.5K	0.004	2.2
热流密度	2%	0.004	2.2
冷板发射率	0.005	忽略不计	0.1

试样表面温度测量采用的是粘贴在试样表面的热电偶温度传感器，并采用了热沉来有助于热电偶与试样表面的热接触，冷板的温度测量则是在冷板的凹槽内埋入热电偶温度传感器，而进一步的改进则需要

采用更合适的方法在试样表面安装测温热电偶。

对于施加在中心计量单元的加热电功率测量不确定度约为 0.03%，那么被测试样表面与冷板表面之间的净辐射热流密度只会受到由于环境影响所带来的附加加热增加或热减少，这种热量的增加或减少主要取决于侧向、边缘护热和辅助护热的效果，而这种影响也会对表面温度带来很大的影响。

5. 总结和今后发展

采用真空型保护热板法对有机玻璃、带涂层玻璃和反射隔热产品的半球向全发射率进行了测量，测量精度能够满足大多数建筑材料的使用要求。进一步的工作是对测试设备进行深入的评价以开展测试过程中更详细的不确定度分析，还需要克服的实际问题是如何评价真空中低密度隔热材料冷热面温度差远大于缝隙两端温度差的情况下的发射率测量。

6. 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.