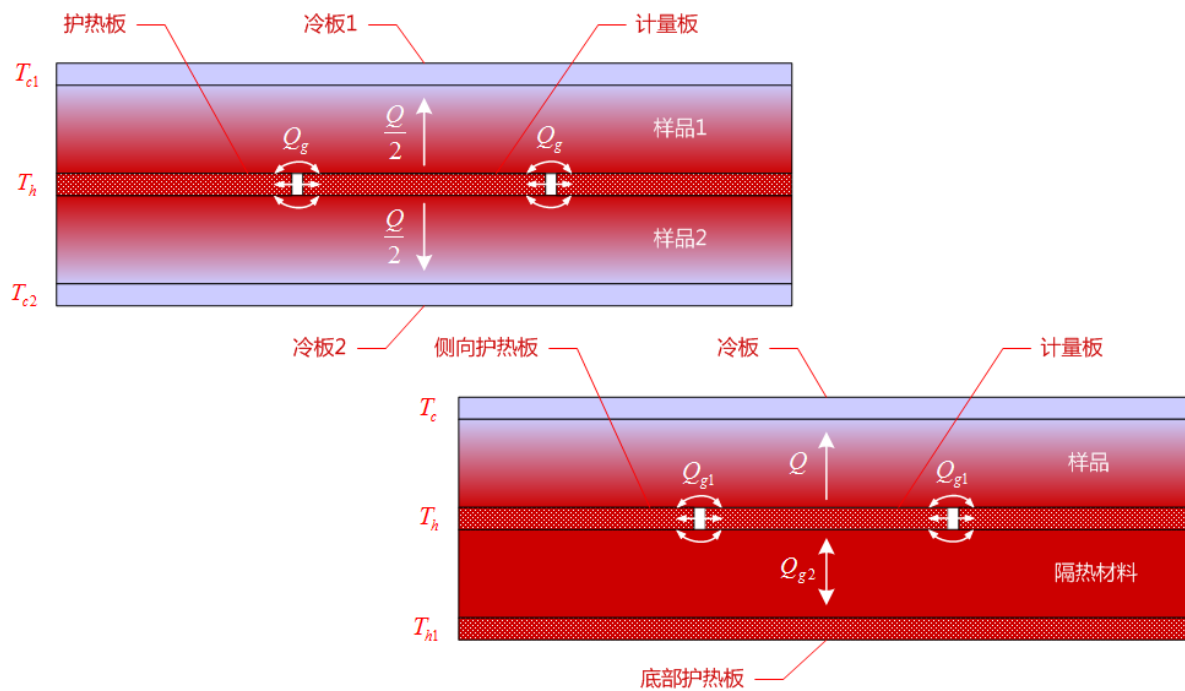


单样品和双样品形式防护热板法导热仪的区别及其应用注意事项

Difference Between the Single-Sample and Double-Sample Guarded Hot Plate Method and Its Application Notes



摘要：针对防护热板法单样品和双样品这两张测量模式的导热仪，从热损防护角度定性的详细介绍了这两种测量模式的区别、工程实现难度和适用范围。同时还介绍了判断防护热板法导热仪在护热方面是否标准规范以及测试能力的几个条件。

关键词：防护热板法，导热仪，单样品，双样品，温差探测

1. 概述

根据被测样品的数量形式，稳态防护热板法导热仪一般分为单样品和双样品测量模式，如图 1-1 所示。

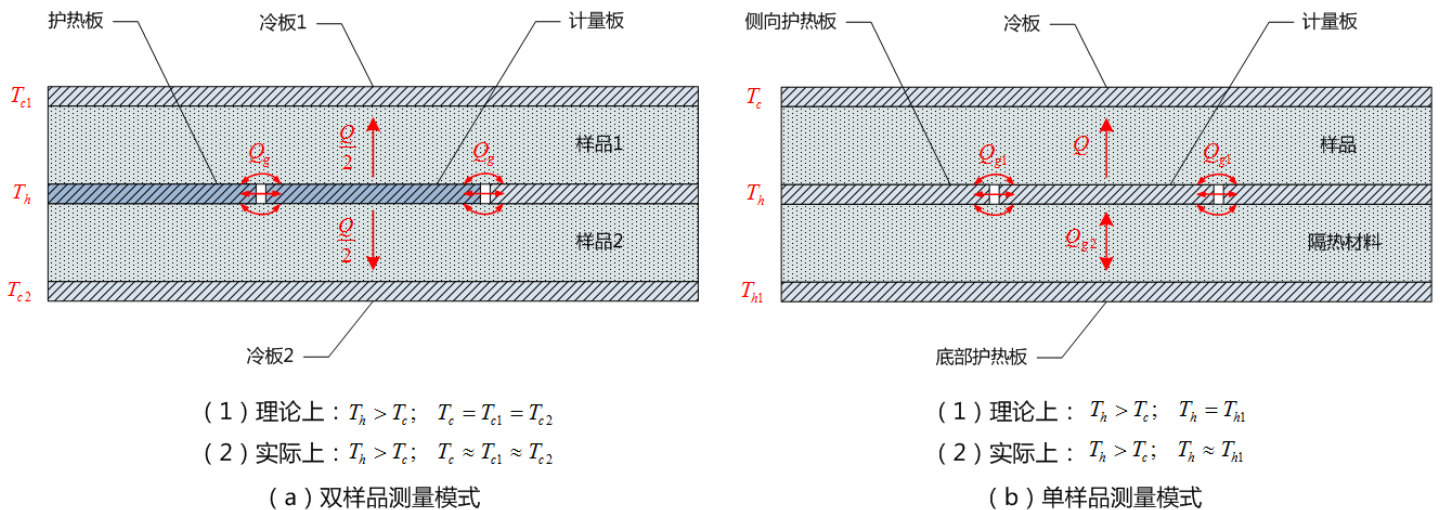


图 1-1 防护热板法导热仪样品结构形式。(a) 双样品模式；(b) 单样品模式

由上图可知，在双样品模式下，两块完全相同的平板样品位于计量板和护热板的两侧。稳态时，计量板产生的热量分为两部分分别流经两个样品进入不同的冷板。在理想情况下，流经每个样品的热量为总热量的一半 $Q/2$ ，样品的热面温度 T_h 大于样品冷面温度 T_c ，两个样品的冷面温度相等 $T_{c1} = T_{c2} = T_c$ ，计量板侧向热损 $Q_g = 0$ 。

在单样品模式下，则只需要一块样品，将双样品模式下的另一块样品用隔热材料代替。稳态时，计量板产生的热量全部流经样品进入冷板。在理想情况下，流经样品的热量为总热量 Q ，样品的热面温度 T_h 大于样品冷面温度 T_c ，底部护热板温度与样品热面温度相同 $T_{h1} = T_h$ ，计量板侧向热损 $Q_g = 0$ 。

从上述双样品和单样品两种测量模式可以看出，两种模式的整体结构和边界保证条件基本相同，主要区别是单样品模式在减少了一块样品的同时，增加了底部护热功能。因此在单样品模式中，由于只使用一块样品，这就对样品的一致性（材质、密度、湿度、尺寸、表面粗糙度和表面平整度等）可以放低要求，导热仪整体结构和实际样品测量操作都变得相对简单，这使得在实际测试中这种单样品模式应用十分广泛。

尽管单样品模式看似比双样品模式简单，但在实际仪器制造和测试应用中，两者有着巨大区别。本文将根据上海依阳实业有限公司在双样品和单样品模式防护热板法导热仪制造及其测试应用中的经验，详细介绍两种模式防护热板法的区别、工程实现的难度和适用范围。

2. 区别

防护热板法普遍应用于低导热隔热材料和制品，但防护热板法的导热系数测试下限并不是可以无限制的低。

单样品与双样品模式防护热板法一样，在测试超低导热系数（或大热阻）样品时会遇到相同的难题，而单样品模式则更严峻。量化的数值分析将在另外一篇文章中进行详细介绍，本文仅从宏观角度进行分析。

单样品导热仪所面临的更严峻问题主要体现在以下几个方面：

(1) 防护热板法导热系数测试的基本原理基于一维稳态传热，边界条件是绝热，其技术核心是热防护，即对中心计量板进行全方位的护热，使计量板上产生的热量尽可能全部垂直穿过样品，形成一维稳态热流测试条件。从图 1-1 所示的样品测试结构图可以看出，对于双样品结构，护热重点在于侧向热防护，而对于单样品结构，则除了侧向护热外，重点则是计量板的底部热防护，这是因为薄板式计量板的底部面积要大于其侧面面积，计量板底部容易产生更大热损。因此，在高精度防护热板法导热仪中，一方面是采用双样品测量模式，最大限度减少热损通道；另一

方面是采用圆形计量板形式，除了考虑加热均匀性易实现外，圆形结构也是为了最大限度减少侧面热损面积。

(2) 由于单样品模式中增加的底部护热功能使得热防护面积增大，如果采用相同能力的温差探测器进行热防护控制，单样品模式下的热损控制精度就要比双样品模式下的热损精度差好几倍。这也就是说，单样品模式要达到双样品模式同样的热损控制精度，就需要大幅度提升温差探测器的灵敏度。

(3) 如果要达到双样品模式中的相同温度梯度，对于单样品模式则仅需要一半的加热功率。同时，由于护热作用，只需很小的热量就可以使计量板达到设定温度下的稳定状态，对于超低导热系数的大热阻样品所需的热量就更小。无论是单样品模式还是双样品模式，防护热板法装置的热损属于固定的系统误差，计量板产生的热量越小则对应热损占总热量的比例就越大，相应的测量误差就越大，这种情形在多层隔热材料、真空绝热板和真空玻璃这些超级隔热材料导热系数测量中表现的非常明显。由此可见，对于超低导热系数或大热阻样品的测试，无论是单样品还是双样品防护热板法，都面临着需要解决超高灵敏度的温差测量难题。对于单样品防护热板法这种技术难度更大，需要将温差探测器灵敏度提升的更高。

3. 计量板侧面积与横截面积之比

为了更直观的认识防护热板法中侧向热损的发生位置和面积大小，本文将进行简单的公式计算以将热损情况和严重程度进行全面展示。

对于防护热板法装置，热损都发生在计量板与样品不接触的表面上，在计量板这些表面处以热量会以导热、辐射和对流的传热形式形成热损。由此，这些热损处的表面积越大，所产生的热损就会越多。

对于双样品防护热板法导热仪，热损发生面为计量板的侧表面。对于单样品防护热板法导热仪，热损除了发生在计量板的侧表面之外，还会发生在计量板的底部表面上。这里具体计算出计量板侧表面积和底部面积的大小区别，以便有一个更直

观的认识。

对于圆形计量板，底部面积与侧表面积之比为：

$$\frac{r^2 \cdot \pi}{2r \cdot \pi \cdot l} = \frac{r}{2l} \quad (1)$$

式中： r 表示圆形计量板半径； l 表示圆形计量板厚度。

对于正方形计量板，底部面积与侧表面积之比为：

$$\frac{D^2}{4D \cdot l} = \frac{D}{4l} \quad (2)$$

式中： D 表示正方形计量板的边长； l 表示正方形计量板厚度。

一般而言，计量板无论是半径还是边长，都大于样品厚度，为保证形成一维稳态热流测试条件，通常它们的比例关系至少为8~10倍（实际往往远大于这个比例），那么对应的面积比例范围就是2~5倍。对于圆形计量板，面积比例范围为4~5倍，而对于正方形计量板，面积比例范围则为2~2.5倍，由此可见圆形计量板的面积比例更大。

4. 结论

综上所述，看似单样品模式是对双样品模式的一种简化，但由于单样品模式中增加了底部护热功能，这使得单样品相对于双样品模式，单样品模式要达到双样品模式相同的测量精度则会面临更高的技术要求，工程实现和保证测量精度的难度更大。因此单样品模式并不是高精度测量的首选模式，普通的单样品模式防护热板法导热仪只适用于以下几种情况：

- (1) 导热系数较大的隔热材料，如大于 $0.03 \text{ W} / \text{mK}$ ，或热阻小于 $1 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$ 。

(2) 一些双样品制样困难、对称的一维稳态温场建立比较困难的情况，但导热系数和热阻范围要满足上述要求。

在有些实际应用中，因为众多因素的限制，只能应用单样品模式的防护热板法装置进行导热和热阻的测试，这种情形主要表现在隔热复合材料、真空隔热材料的隔热性能测试表征中。在目前的防护热板法应用中，针对这些超级隔热材料和制品，实际上存在着很大的问题，普遍现象就是导热系数测量的重复性和再现性很差，主要原因就是在测试这些超级隔热材料时热损问题会被明显的凸显出来。针对这些问题及其解决方法和关键技术，我们将专文进行量化描述。

附录：判断防护热板法导热仪在护热方面是否规范的几个条件

护热技术是防护热板法导热仪的关键技术之一，而温差探测技术则是护热技术的核心，随着测量精度和测试温度范围的提升，会给温差探测技术提出更高的要求，相应的制造难度更大，故障率愈高。

目前很多防护热板法导热仪，为了降低制造难度和仪器的故障率，普遍都规避了标准测试方法中规定的使用温差探测技术（如热电堆温差探测装置），而改为采用铂电阻等精度较高的温度传感器直接进行温度测量和控制来进行护热。但由于温度传感器的灵敏度远不如由许多只热电偶构成的热电堆温差探测器，从而造成测量误差很大。这种误差在普通隔热材料导热系数（ 0.03 W/mK 以上）的测试中并不明显，但在超低导热系数隔热材料的导热系数（ 0.03 W/mK 以下）的测试中，误差明显增大的现象则会十分突出。

因此，可以根据以下几个条件来判断防护热板法导热仪在护热方面是否规范，同时这也是判断测量能力的一种简单方法。

(1) 是否采用了温差探测器。双样品模式下，计量板的侧向护热是否采用了温差探测器，一般都是采用多只热电偶组成的热电堆温差探测器。热电偶数量越多，温差探测器越灵敏，护热效果越好。

(2) 单样品模式中底部护热温差探测器采用了多少只热电偶。单样品模式下，除了要求具有与双样品模式下相同的侧向护热温差探测器之外，还要求底部护热温差探测器装置的灵敏度要更高，所用的热电偶数量更多，往往会成倍的增加。

(3) 温差探测器多数采用的是热电偶组成的热电堆，探测器越灵敏，需要的热电偶数量就越多，越多的热电偶使得流经热电偶丝进行传热的漏热量增大。

(4) 热电偶制成的热电堆式温差探测技术不可能无限制提高灵敏度，这主要是因为工程实现上难度很大，除非采用高灵敏度温差探测的新技术和新手段。