

## HOT DISK

热传导性能测试的更佳方式

Hot Disk 公司开发、制造并销售基于瞬变平面热源技术 (TPS) 的导热率、热扩散率和比热容的测试仪器。本技术的专利持有人— Silas Gustafsson 博士是 Hot Disk 公司的活跃成员之一。TPS 技术被全世界众多实验室的研究人员所采用，通常被称为 Hot Disk 方法或“Gustafsson 探针”。

Hot Disk 公司提供给客户多种探头、软件、设备及支持，可用于各种不同类型材料的热传导性能的测量，并不断致力于提高测试方法的便利性和结果的精确性。

\*Original patent applications: Sweden, 461797; UK, 406282; USA, 5044767; Japan, 2928303. Anisotropic materials, PCT application; PCT/SE00/00868.

### References

1. S E Gustafsson: Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Rev. Sci. Instrum.* 62(3), 797 (1991).

2. B M Suleiman, I UL-Haq, E Karawacki, A Maqsood and S E Gustafsson: Thermal conductivity and electrical resistivity of the Y- and Er-substituted 1:2:3 superconducting compounds in the vicinity of the transition temperature. *Physical Review B*, 48(6), 4095 (1993).

3. T Log and S E Gustafsson: Transient Plane Source (TPS) Technique for Measuring Thermal Transport Properties of Building Materials. *Fire and Materials* 19, 43 (1995).

4. M Gustavsson, N S Saxena, E Karawacki and S E Gustafsson: Specific Heat measurements with the Hot Disk Thermal Constants Analyser. *Thermal Conductivity 23* (1996) Technomic Publ. Co.

5. M Gustavsson, E Karawacki and S E Gustafsson: Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors. *Rev. Sci. Instrum.* 65(12), 3856 (1994).

6. J S Gustavsson, M Gustavsson and S E Gustafsson: On the Use of the Hot Disk Thermal Constants Analyser for Measuring the Thermal Conductivity of Thin Samples of Electrically Insulating Materials. *Proceedings of the 24th International Thermal Conductivity Conference, Pittsburgh, PA, USA, October 26-29, 1997.*

7. D Lundström, B Karlsson and M Gustavsson: Anisotropy in Thermal Transport Properties of Cast  $\gamma$ -TiAl Alloys. *To be published in Z Metallkd.*

8. T Ericson, L Hålldahl and R Sandén: A Facile Method for Study of Thermal Transport Properties of Explosives. *Eleventh*

*symposium on chemical problems connected with the stability of explosives, Båstad, Sweden 1998.*

9. J Lohan, P Tiilikka, C-M Fager and J Rantala: Using experimental analysis to evaluate the influence of PCB construction on the thermal performance of four package types in both natural and forced convection. *Proceedings ITherm 2000, San Diego, USA.*

10. C Dinges: Heat conductivity in copper-nickel alloys. *Master's degree project UPTEC Q 00 027, Uppsala University, Sweden.*

# HOT DISK®

热常数分析仪



数秒内完成热导率(Thermal Conductivity)、热扩散率(Thermal Diffusivity)和热容(Heat Capacity)的测试

凯戈纳斯仪器商贸(上海)有限公司  
上海市四平路775弄1号天宝华庭1115室, 200092  
Tel: +86 21 5836 2582  
Cel: +86 13501992576  
www.hotdiskinstruments.com www.hotdisk-china.com



# 热

## 传导性能的测量：粉末、塑料、液体、纤维、建筑材料、生物材料...

Hot Disk 热常数分析仪

迅速并准确地测量各种不同性质材料的热导率、热扩散率和热容

### 基本原理—瞬变平面热源法

Hot Disk 的测量原理是基于由 Silas Gustafsson 博士发明的瞬变平面热源法 (Transient Plane Source Method, TPS), 通常被称作“Gustafsson 探针” (refs 1-6)。

在本方法中, 探针是一个平面的探头, 系由导电金属镍经刻蚀处理后形成的连续双螺旋结构的薄片, 外层为双层 Kapton 保护层。外层的 Kapton 保护层的厚度只有 0.025 mm, 它令探头具有一定的机械强度, 同时保持探头与样品之间的电绝缘性。探头通常被放置于两片样品中间进行测试。Hot Disk 提供了不同尺寸与构造的探头供客户选择, 适用于各种不同性质样品的测试。

在测试过程中, 电流通过探针时, 产生一定的温度上升, 产生的热量同时向探头两侧向样品进行扩散, 热扩散的速度依赖于材料的热传导特性。通过记录温度与探头的响应时间, 材料的这些特性可以被计算出来。

由于 Hot Disk 探针既是热源又是温度传感器, 因而, 本方法非常快捷和便利, 同时也相当精确。

### Hot Disk 与静态方法相比的众多优点

Hot Disk 所采用的瞬变方法与静态方法相比具有很多优点。首先, 测试速度更加快速。你只需直接测试由探头传到样品中的热量, 而不必等待样品中形成温度梯度, 因此可以节约大量的时间。其次更为重要的是, 瞬变平面热源法(TPS)不会受到接触电阻的影响。在静态方法中, 热电偶与样品之间形成的接触电阻是测试方法的固有误差, 静态方法本身无法对其进行补偿, 即使在热导率只有 1-2 W/mK 时, 接触电阻所产生的消极作用仍无法避免。

在瞬变方法中, 只有在未受干扰的材料中的热传播得到的数据被用于计算, 由探头保护层、表面粗糙或探头与样品间小气穴引起的干扰数据可以很容易地被去掉。



将探头简单地放置于两片样品中间, 产生的热量在探头两侧向样品中传播。

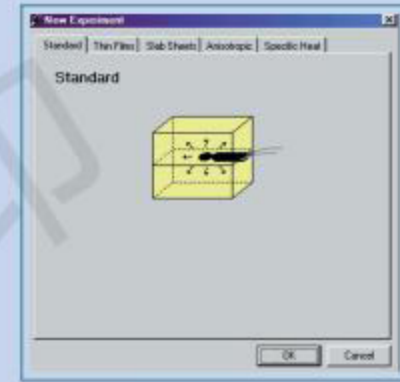
### 基本法

采用基本法进行测量时, 探头被置于两个样品之间, 形成类似三明治的结构。本方法适用于各种不同类型的材料, 如苯基发泡塑料等高度绝缘的聚合物, 陶瓷以及金属等良导体。

通过调整探头的尺寸、测试功率和时间, 可以对不同材料进行测试。通常, 对绝缘体采用较低的功率和较长的

测试时间, 对良导体则采用较高的功率和较短的测试时间。例如, PMMA 是较好的绝缘材料 (导热率约为 0.2 W/mK) 在 0.2 W, 160 S 的测试条件下, 可以得到较好的结果。

相反, 不锈钢 (导热率约为 13.50 W/mK) 应当采用 3 W, 12 S 的测试条件。直径为 13 mm 的探头在以上两个样品的测试中均可使用。



### 粉末和液体的测量

沙子、面粉和糖之类的粉末样品的热性能参数也可以用基本法进行测量。当样品为粉末时, 只需将探头简单地插入被测样品, 使其平躺于样品中即可。当样品为液体时, 通常采用直径较小的探头以避免形成对流, 采用较低的功率和较短的实验时间, 可以精确地测量与水粘度相近或略大的液体。

### 单面测试法

采用基本法进行测量通常需要两片样品, 但当无法得到两片样品, 或者被测样品无法被切割时, 单面测试法是一个较好的选择。单面测试法中, 探头的一面放置了一片已知热性能的材料, 该材料相应的性能参数被输入软件用于计算, 计算软件据此得出未知材料的热传导贡献。

### 便捷的计算

当被测样品与对照材料的性能相近时, 采用单面测试法可以得到较好的结果。这一方法使 Hot Disk 具有很大的测试弹性——可以用于原位测量, 单面测试法的测试过程与基本法一致, 所需的数据输入相应的计算窗口。

### 不同类型的研究

对于不同的样品, 探头尺寸的选择对应不同的标准。探头的尺寸和测试时间必须和样品的热扩散率相适应。当样品的尺寸不受限制时, 可以采用不同的方法进行研究。例如, 对一个不均匀材料, 使用大尺寸的探头和较长的测试时间, 可以得到较大面积上的热传导性能的平均值。同样也可以使用小尺寸的探头 (0.49 mm 半径) 得到样品在不同位置上的不均匀性。这进一步说明了 Hot Disk 测试模式的内在弹性。

这一方法可用于测量纸、织物、布和聚合物薄膜等薄层材料的导热率。根据样品性质的不同，样品的厚度可以从 10  $\mu\text{m}$  到数百  $\mu\text{m}$ ，甚至几个毫米，样品的导热率通常较低，小于 10 W/mK。

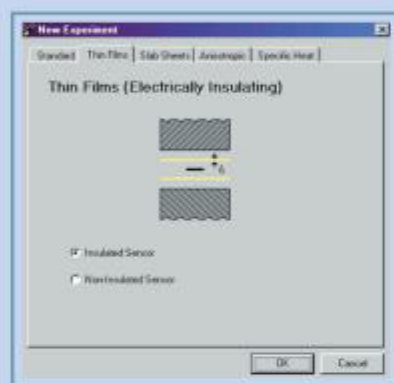
为了得到较为精确的结果，在薄膜法中，我们使用一个四方型、无涂布层的镍金属探头取代在基本法中的

Kapton 涂布层探头。样品在测试时，用已知热性能的不锈钢作为衬底，测试过程假设不锈钢为样品，采用较高的功率和较短的测试时间。通过分析温度

对时间曲线的位移，可以得到薄层材料对热传导性能的影响，从而计算出样品的导热率。

#### 专用的、更为坚固的探头

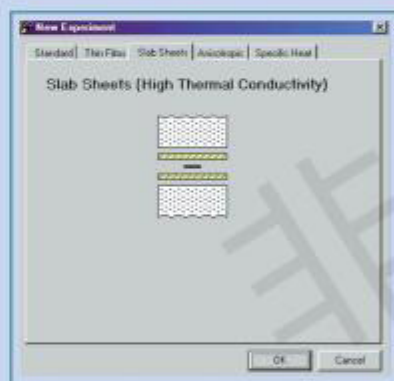
由于无涂布层的高精度探头相当脆弱，Hot Disk 同时提供有 Kapton 涂布层的探头，它对许多薄层材料具有足够的精度，同时使用寿命大幅度延长。由于 Kapton 涂布层具有电绝缘性，它也可用于测量电导材料。



平板法适用于导热性相对较高的薄层材料。例如，厚度为 0.5-2 mm，导热率为 18-20 W/mK 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷，厚度为 0.5 mm，导热率为 130-400 W/mK 的硅片等样品都可以用平板法进行测试。样品通常用绝缘材料作为衬底，使用标准探头，并在较高的功率和较短的测试时间内进行测量。

#### 在相似合金中发现的差异

在一项对 Cu/Ni 合金的导热率进行的实验中，合金组成中 Ni 的含量介于 0.2-1.6% 之间，研究不同的组成与温度 (-40°C-125°C) 对导热率的影响。合金的厚度约 2 mm，测试时间为 1 S。研究发现，这些合金的热性能参数之间存在统计上的显著差异，材料的导热率最高可达 310 W/mK。



#### 电子材料

了解硅片、陶瓷片、聚合物、粘结剂和其他一些材料的精确的热传导性能对电子封装元件和印刷电路板 (PCBs) 具有重要的意义。Hot Disk 测试方法为这类材料提供了精确的测试方法。

另一种使用 Hot Disk 技术的方式是让探头模拟 PCB 上组分的工作。测试的过程是一个完美的模拟，

探头在测试中产生热，测得的温度和时间的关系提供了 PCB 上某个特定位置的冷却能力的精确信息。

在近期的研究中，Hot Disk 用这种方法对 PCB 上组分的工作进行了模拟，得到的数据与其他几个设计用于预测不同类型 PCB 的导热率的模型进行了比较，这些模型

得到的数据几乎有一个数量级的误差。而 Hot Disk 的导热率直接测量法所预测的导热数据可以与在 PCB 上直接的测量进行比较。

#### 新的应用领域

Hot Disk 除了在许多主流应用领域中取代静态方法，同时它也在拓展新的应用空间。例如，该方法可以测量非常小的样品，并只产生很低的温度增加，这对测试炸药的热传导性能相当理想。对各种不同类型的弹药和推进剂的测试都可以得到非常精确和可重复的结果。



#### 高温测试

Hot Disk 方法所进行的所有测试都必须在等温条件下进行。研究人员经常试图了解不同温度下热性能的变化，Hot Disk 为此开发了一套高温测试系统，包括一个熔炉，功率调整仪和控制软件，该系统可以在不同的预设温度下进行自动测量。

样品和相应的探头及电缆被固定在样品支架上后，放入熔炉。

通过控制软件选择一系列的测试温度。对应每个温度，输入相应的重复次数、功率和测试时间，这些参数对不同的温度可以是不同的。操作者同时决定温度稳

定性标准，即确定等温条件下的温度变化范围。

在测试前，系统将对温度稳定性进行检查，首先是熔炉，然后对样品内部的温度进行确认。一旦实验开始，系统将自动运转，将每一个测量文件记录在硬盘上。



Hot Disk 可配套的管式炉高温系统

# 广泛的应用领域：在电力、汽车、包装、生物、制药...

许多研究人员发现，与其他传统测试方法相比，使用 Hot Disk 热常数分析仪测量热传导性能具有明显的优越性。

除了前面所提及的多项优点，Hot Disk 提供了交互式软件，以使用户在测试过程中了解所获得数据的质量与精确度。

探测深度是一个有用的检验点，它反映了产生的热到达样品内的深度。另一个检验点是样品的扩散率与测试时间和探头尺寸的比值，当比值在一定范围内时，对 TPS 方法所作的物理假设能够实现。

以下是三家使用 Hot Disk 进行研究工作的评价：

“我们每天使用 Hot Disk 进行材料界面热性能的测试，它也能用于测试粘胶和液体。”  
JASON SANDERS, THERMOSET, INDIANAPOLIS, IN, USA.

对我们而言，测试各种不同尺寸的样品而无须进行样品制备非常重要。”  
DR. KAUSHIK CHAKRABARTY, LUCENT, NORCROSS, GA, USA.

我们使用 Hot Disk 标准方法对电路板的热界面和导热率进行日常质量控制，它同激光闪光法和 ASTM D5470 法测得的数据相当一致，但操作更为方便、快捷。”

FOREST HAMPTON III, THERMAGON,  
CLEVELAND, OH, USA.



## 各向异性材料

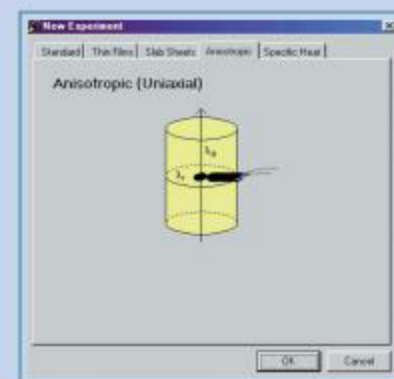
Hot Disk 为同时测量样品在两个不同方向上的导热率和热扩散率提供了独特的新方法。这一方法可应用于纤维增强型材料的测量，这类材料由于纤维方向的不同，热性能存在差异。



两个片层样品被置于探头两侧，纤维的轴向与探头表面垂直。样品的热容必须是已知的，并被输入计算软件。在测试过程中，垂直和平行于探头表面的不同方向上的导热率和热扩散率同时被测得。

当 Hot Disk 方法这样使用时，许多象不锈钢之类通常被认为是各向同性的材料被测得是各向异性的。

例如，瑞典 Chalmers University of Technology 的研究人员对浇铸铝化钛合金进行了研究，该合金的组成为 Ti-48Al-2W-0.55Si。这一材料具有不同的晶相— $\gamma$  相和  $\alpha_2$  相。不同晶相的含量和取向随固化温度和热处理



技术而变化，对于一条圆柱形的材料，其在内核与边缘的热传导性能是不同的。

研究人员发现，对于不同的材料，室温下，材料的导热率在 12-14W/mK 间变化，700°C 时，材料的导热率在 20-22W/mK 间变化，在所有的温度下，导热率和热扩散率的各向异性约 15%。制样技术的不同会造成材料热性能之间较大的差异。Hot Disk 方法的独特性在这一研究中被用于测量探头垂直与平行方向的不同性能差异，这也是对此类未知结构的合金首次进行的探测。

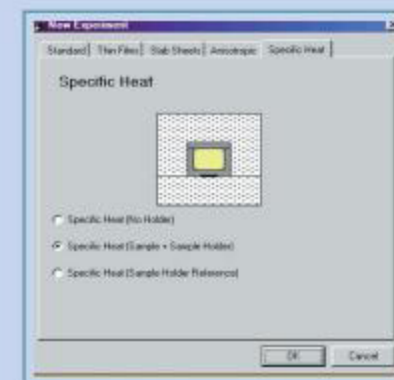
## 热容的直接测量

热容在 Hot Disk 的基本法和平板法中通过直接计算导热率与热扩散率的比值得到，这一结果对通常的应用已足够精确。

但当材料要使用各向异性法进行测试，或是为了其他的目的需要更为精确的热容值时，可以采用热容的直接测量法。

这一方法使用一个特别设计的测量槽，将标准探头与之连接，并对其进行加热。首先加热空的测量槽，记录温度及时间响应，然后将样品放入测量槽，重复该实验，此时，测量槽的热特性发生了变化，由此得到样品在某一温度下的热容。

对于 Cu/Ni 合金之类的良导体，直接热容法可以得到非常精确的结果。该方法可以测得不同的组成、孔道体积对热性能造成的影响。



# 金属、合金、陶瓷、矿石、复合材料...



## 瞬变平面热源法的主要优点

- ▶ 直接测量热传播，可以节约大量的时间
- ▶ 不会和静态法一样受到接触电阻的影响
- ▶ 只有由样品中的热传播得到的数据被用于计算
- ▶ 无须特别的样品制备，只需将两个相对平整的表面置于探头上

同时作为热源和温度传感器，Hot Disk 探针向您提供快捷、便利和精确性。



## 详细规格

### 测量单元

Hot Disk 系统测试样品的导热率，单位为 W/mK。基本法和平板法测得的热扩散率的单位为  $\text{mm}^2/\text{s}$ ，热容的单位为  $\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$ 。薄膜法可以测导热率。各向异性法可得到两个不同方向上的导热率和热扩散率，但需知道被测物体的热容  $C_p$ 。对良导体 ( $>2 \text{ W}/\text{mK}$ ) 而言，在室温下采用比热法可以得到较高精度的热容，测得的热容值可用于各向异性法。

### 导热率范围

选择合适的测试方法、探头尺寸和测试参数，Hot Disk 可测的导热率范围在  $0.005\text{--}500 \text{ W}/\text{mK}$  之间。

对体积较大的绝缘材料，可采用基本法进行测量，选择较低的功率和较长的测试时间可以得到较为精确的结果。对薄层绝缘材料 ( $10 \mu\text{m}$  到几个毫米)，可采用薄膜法。对象铜、硅晶片和 SiC 之类的良导体应采用平板法，并选择较高的功率和较短的测试时间。各向异性法只能用于测量较厚的样品。

### 温度范围

选择合适的测试方法、探头尺寸和测试参数，Hot Disk 的测量温度范围在  $10 \text{ K}\text{--}1000 \text{ K}$  之间。

使用 Kapton 涂布层探头时，温度最高到  $200^\circ\text{C}$ ，使用云母覆层探头时，最高可测到  $700^\circ\text{C}$ 。在上述两种情况下，都必须使用熔炉和控制软件，以及特别的样品支架和电缆。

### 样品形状和尺寸

在使用纯镍金属探头进行薄膜法测试时，样品的尺寸大约为  $30 \times 30 \text{ mm}$ 。较大尺寸的样品可使用 Kapton 涂布层探头。采用基本法、平板法和各向异性法进行测试时，样品的最小尺寸依赖于样品的扩散率、探头尺寸和测试时间。总之，样品越大，越容易寻找到适宜的参数。

### 精度

正确地选择样品的尺寸、探头、测试功率和时间，并让样品在测试

前达到温度平衡，导热率的精度将达到  $\pm 1\%$ 。

### 执行

在使用基本法、平板法和各向异性法时，样品的形状不需进行特别加工，但必须具有一个相对平整的平面，以便与探头较好地接触。对平板法和薄膜法，样品的厚度必须精确测量，它的数值将输入软件用于计算。

系统需要 3-4 个  $110\text{--}220\text{V}$ ， $50\text{Hz}$  和 6 安培的主输出口，不需要冷却水，在工作时，室内温度的变化不应超过  $1\text{--}2^\circ\text{C}$ ，在测试设备上不应出现非常规气流。

Hot Disk 得到的结果可转化为 Microsoft Excel 文档进行处理。但所有的计算只能在系统电子软件包中的一个特别的计算装置中进行。

\*Trademark of Microsoft Corporation.

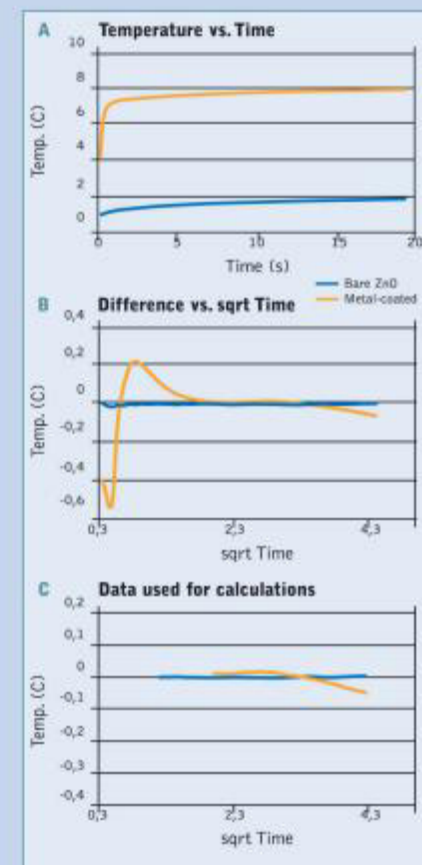
## 与其他方法的比较

### 1. Hot Disk 不受接触电阻的影响

Hot Disk 方法与静态方法相比的一个主要优点是会受到接触电阻的影响，而接触电阻是静态方法存在的固有误差。我们将通过以下对两个样品的测试进行说明。

一个样品是圆柱型的纯陶瓷，主要成分是  $\text{ZnO}$ ，另一个样品是相同的材料，但表层覆了一层  $60 \mu\text{m}$  的铝金属。采用同样的功率、测试时间和相同的探头进行测试。

A 图中两条原始数据曲线清晰地表明两个样品的温度对时间的响应是不同的。在测纯陶瓷样品时，探头的 Kapton 涂布层的影响与其对有铝覆膜样品的影响完全不同。覆膜样品的总的温度增加值是未覆膜样品的四倍，造成这一差别的原因



是铝涂布层。B 图中的曲线更清晰地反映了这一点。C 图中去掉了实验最初部分的影响，只使用在材料中测得的数据，没有覆膜的样品去掉了前 13 个数据点，覆膜的样品去掉 39 个点，得到的结果列于下表中。

实验结果表明，采用 Hot Disk 的瞬变方法，可以很容易地去除探头涂布层、表面粗糙、气穴及薄膜涂层的影响。换言之，无须考虑探头与样品之间的接触电阻的影响。原因是接触电阻只在瞬变最初产生了恒定的温度变化，这一变化被记录下来，用于结果的评估，并在数据处理时被去掉。

	Bare sample	Al-coated sample
Thermal Conductivity (W/mK)	24.71	24.81
Diffusivity ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	9.10	9.11
Heat Capacity ( $\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$ )	2.77	2.75

### 2. 结果的精度验证

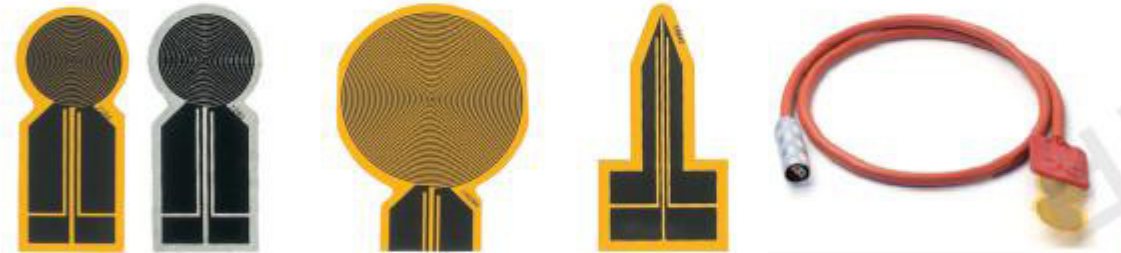
采用不同的方法对不同材料的测试比较证明，用 Hot Disk 方法测得的导热率在 5 个数量级范围内高

度精确。其中的一项研究采用 Hot Disk 方法与其他一些方法对 PMMA, Cecorit, 铝, 聚苯乙烯和不锈钢的热传导性能进行了比较。

# Hot Disk 系统的技术信息

## 基本描述

Hot Disk热常数分析系统通常包括一台主机通过USB端口与一台计算机连接，一套用于测试控制和数据记录、收集与分析的软件，以及探头和样品支架。Hot Disk所遵循的瞬变平面热源法属于绝对测试方法，可以免去校准的工作。在进行非室温测试时，需要特别添加控温设备，如低温釜或高温炉。



Hot Disk 提供了一系列标准探头，并可根据客户的不同要求进行设计开发。

Hot Disk 提供了一系列标准 Kapton、云母覆层探头和纯镍金属探头，尺寸从 1 mm 到 60 mm 不等。

使用单面测量法，通过延长线路，将探头的一侧与所研究的物体直接接触，探头另一侧放置一个已知热性能的材料，可以对物体进行原位测量。

Hot Disk 公司和它的代表机构向所有客户提供 Hot Disk 系统，并根据客户的不同应用提供不同配置的建议。如需更多信息，请与我们联系。

## 技术和应用支持

Hot Disk 向客户提供仪器的安装和最初的使用培训。同时，Hot Disk 还将向客户提供持续技术支持和最新应用信息。

# Hot Disk 型号技术参数表

	TPS3500	TPS2500S	TPS2200	TPS1500	TPS500S
导热系数范围 (W/mK)	0.005~1800	0.005~1800	0.01~500	0.005~20	0.03~200
热扩散系数范围 (mm <sup>2</sup> /S)	0.01~1200	0.01~1200	0.01~300	0.01~100	0.02~40
比热容范围 (MJ/m <sup>3</sup> K)	0.01~5	0.01~5	0.01~5	0.01~5	0.1~4.5
最短测试时间 (S)	0.1	1	2.5	20	2.5
导热系数精度	优于 3%	优于 3%	优于 3%	优于 3%	优于 5%
导热系数重复性	优于 1%	优于 1%	优于 1%	优于 1%	优于 2%
ISO22007-2:2008	Yes	Yes	Yes	Yes	部分遵循
GB/T 32064-2015	Yes	Yes	Yes	Yes	部分遵循
单面测试	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
固体、粉末、胶体	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
液体 (低粘度)	Yes	Yes	Yes	No	Yes
基本模块	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
1 Dim	Yes	Yes	No	Yes	Yes
Structure Probe	Yes	Yes	No	No	No
平板模块	Optional	Optional	Optional	No	Optional
薄膜模块	Optional	Optional	Optional	No	No
各向异性和比热	Optional	Optional	Optional	Optional	有限比热功能
低密度/高绝热	Optional	Optional	Optional	Optional	No
自动控制 TCP/IP	Yes	Yes	Optional	Optional	No
探头半径可选范围	0.5~30mm	0.5~30mm	2~30mm	3.2~30mm	2.0~6.4 mm
温控范围 (°C, 需要配额外的温控装置)	-250~1000	-250~1000	-50~1000	-50~750	-100~300