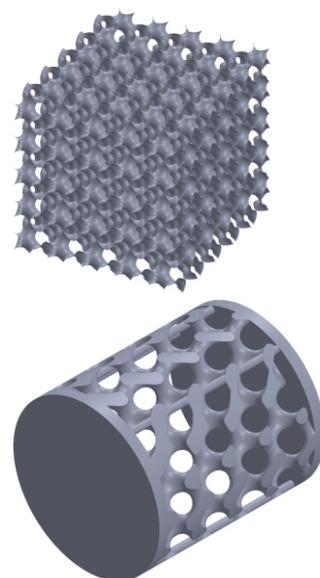


# 金属泡沫和多孔金属材料热导率测试 方法选择和测量准确性保证措施

**Selection of Thermal Conductivity Test Methods for Foam and Porous  
Metal Materials and Measures to Ensure Measurement Accuracy**



摘要：针对金属泡沫和多孔金属材料热导率测试，本文介绍和分析了常用的各种测试方法，选择了热流计法作为金属泡沫和多孔金属材料热导率测试的适合方法，提出了热流计法测试过程中测量准确性的保障措施，同时针对热流计法的不足，提出了一种新型绝对瞬态法（热波法）。热波法具有更高的测试精度、宽热导率和温度测试范围、样品形式多样以及测试仪器低造价的特点。

## 1. 问题的提出

金属材料中存在有很大体积比（典型的约占 75%~95%）的气孔，如果这些气孔是相互独立的闭孔，则称为金属泡沫；如果气孔是开孔，则称为多孔金属。为叙述方便，本文将金属泡沫和多孔金属通称为多孔金属材料。

多孔金属材料的类型众多，如典型的泡沫铜铝镍材料，如图 1-1 所示；如 3D 打印的 TPMS 晶格结构钛合金多孔材料，如图 1-2 所示。



图 1-1 各种规格的泡沫铝



图 1-2 TPMS 晶格结构钛合金多孔材料

由于多孔金属材料的独特结构，特别是孔的闭合形式、形状、尺寸和气孔率的不同，使得多孔金属材料整体看似是均质材料，但在小尺度上又有严重的非均质特性，这就给这种材料的热导率准确测量带来的很大困难。由此，如何选择合理的热导率测试方法，以及采取哪些措施来保证测量的准确性，就成为准确测试评价多孔金属材料传热性能的关键。

本文将特别针对多孔金属材料，介绍现有的各种热导率测试方法，选择出多孔金属材料热导率测试的合适方法，同时介绍为保证热导率测量的准确性需要哪些具体措施。

## 2. 常用热导率测试方法介绍

多孔金属是一种以热导率普遍较高的金属材料为基体且内部含有大量气孔的刚性材料。由于气孔的存在，使得多孔金属材料整体的密度要远小于基体金属密度，因此多孔金属材料的整体热导率一般会比基体金属热导率低 1 个数量级以上，但由于有基体金属的存在使得整体热导率又无法达到绝热材料的水平，通常依据基体金属的不同，多孔金属材料的热导率在 0.05~10W/mK 范围内。

由于多孔金属材料的热导率介于低导热和高导热之间，理论上可以采用很多测试方法对多孔金属材料热导率进行测量，这些测试方法主要分为稳态法和瞬态法两类。

### 2.1. 稳态法

稳态法热导率测试是对样品在所关心的方向上施加了与时间无关的温度梯度，其主要优点是高精度、测量公式简单和测量定向热导率的能力。此外，测试过程中的热流穿过整个被测样品，是对完整样品的整体热导率进行测量。稳态法测量中需要在被测样品上形成一定的温度梯度，温度梯度可能使得热导率随温度变化的测量变得复杂，因此稳态法测量得到的是整体样品的等效热导率，代表了导热、对流和辐射三种传热机理的耦合效应。稳态法另一个特点是确保热稳态所需的测量时间较长，特别是对于低导热材料。

在测量精度最高的绝对稳态方法中，可直接测量热导率，这种方法的典型代表是常用的保护热板法，相应的标准有 GB/T 10294、ISO 8302 和 ASTM C177。样品位于热板和冷板之间以在样品内产生温度梯度，当冷热板度差小于 20°C 时，测量的是热导率；冷热板温差大于 20°C，由于热流和辐射传热的存在，测量的是等效热导率。保护热板法能作为一种绝对测量方法，是因为其中心量热计中的电加热热量完全无损的流经被测样品，精确测量并可溯源的电转换为量热计热量输出，特殊的热保护装置对量热计进行绝热隔离

消除侧向热损。保护热板法的测量原理如图 2-1 所示。

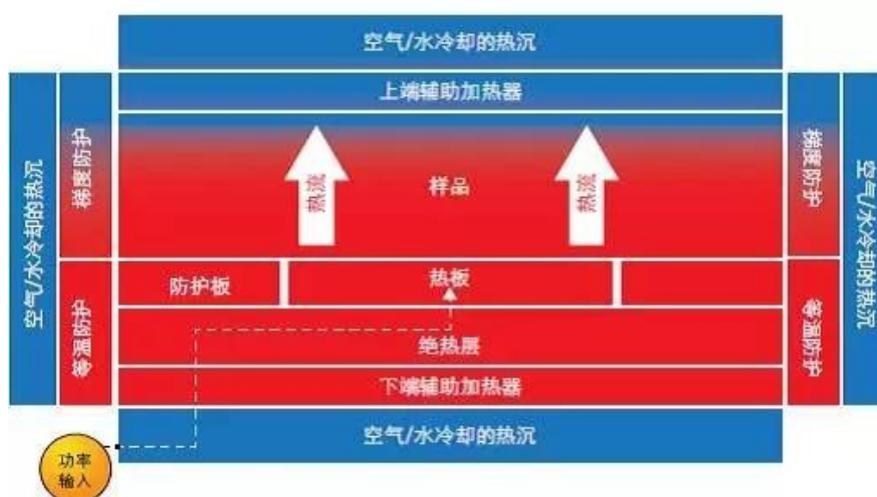


图 2-1 保护热板法热导率测量原理图

目前采用保护热板法的热导率测试仪器一般样品截面积尺寸在 300mm×300mm 以上，大样品尺寸的选择主要是保证样品边长与样品厚度有一个合适的比例，从而有效保证流经样品厚度方向上的热流是一维形式。

相对于绝对法是一种相对稳态法，也可直接测量热导率，典型的有热流计法和保护热流计法。热流计法是上述保护热板法的一种变形，这类方法不是直接测量加热热量，而是通过放置在不同位置处的热流计测量流经被测样品的热流量，一般是将热流计放置在样品两端，相应标准是 GB/T 10295、ISO 8301 和 ASTM C518，其原理如图 2-2 所示。

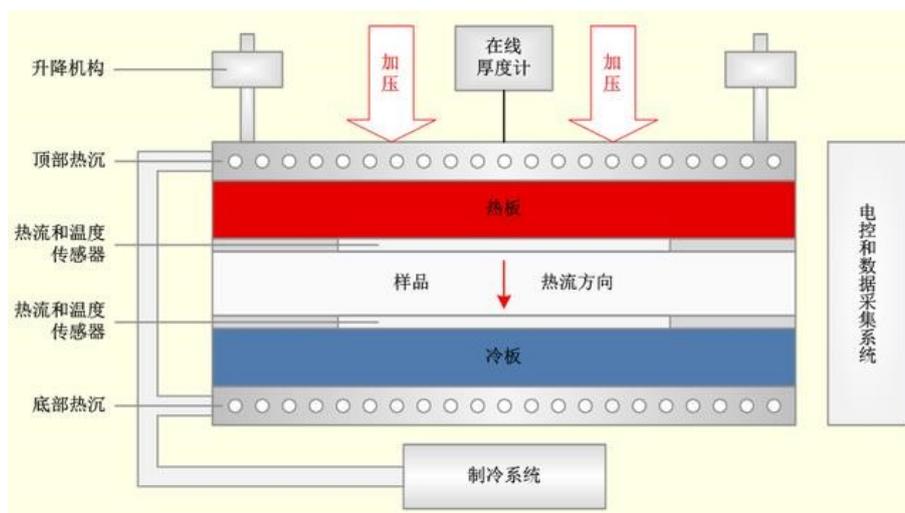


图 2-2 热流计法热导率测量原理图

热流计法的特点是热流计必须经过绝对法进行校准，所以测量精度要低于绝对法，但热流计法可适用于小尺寸样品和高温测试，特别适用于实际隔热工况下大温差隔热材料

的等效热导率测试，可准确评价冷热面大温差下多种传热机理共存时的等效热导率。

在稳态热流计中，热流计可以有多种结构形式，热流计可以薄膜结构，也可以是块体结构。薄膜结构的热流计一般直接布置在被测样品冷端，如图 2-2 所示，而块体结构热流计则采用校准过的已知热导率材料并布置在被测样品的两端（或冷端），如图 2-3 所示。采用块体热流计进行材料热导率测试的标准有 ASTM D5470、ASTM E1225 和 ASTM E1530。热流计法的主要特点是可以适用于各种规格尺寸大小和厚度的样品材料，薄膜结构热流计一般适用于高低温范围内低导热材料的热导率测量，块体结构热流计一般适用于常温附近和压力加载条件下的中高热导率测量，但为了保证测量精度，热流计法需要对热流计进行准确校准和侧向漏热处理。

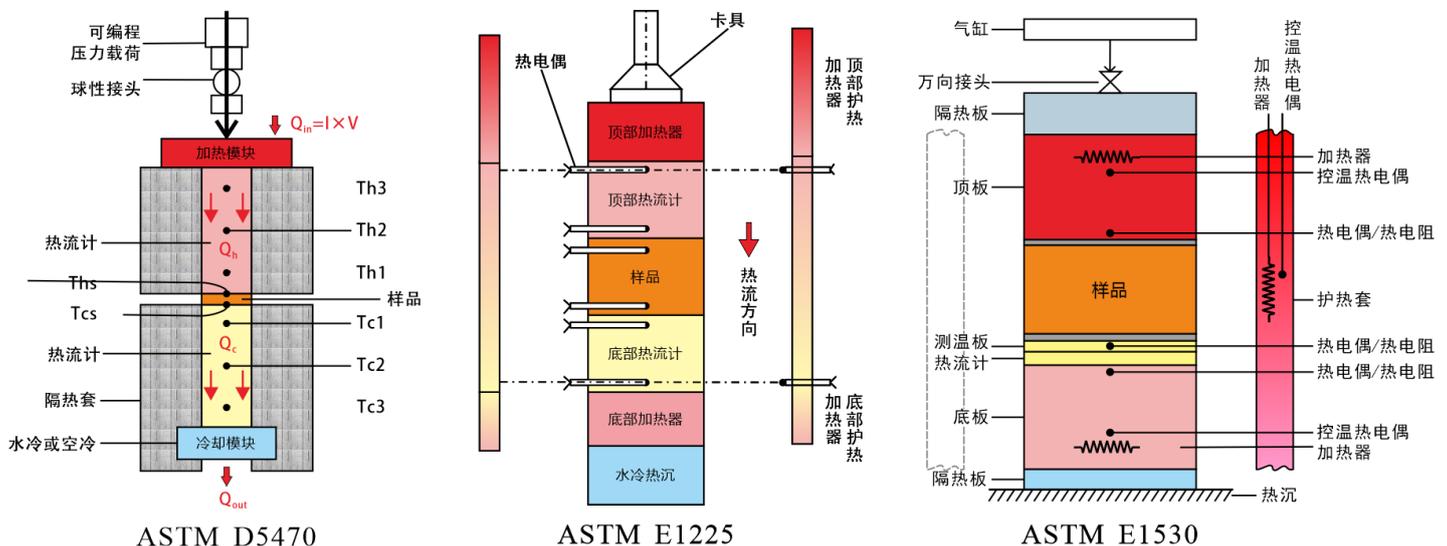


图 2-3 三种块状热流计法热导率测量原理图

## 2.2. 瞬态法

所谓瞬态法一般是通过接触式传感器或非接触光源给温度恒定样品加载一个热脉冲扰动，使受热面温度升高  $0.5\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，通过检测传感器或样品前后表面的温度响应，来计算得到相应的热导率或热扩散率。

常用瞬态法主要包括瞬态热线法、瞬态热带法、瞬态平面热源法（HOT DISK 法）和闪光法。热线法、热带法和平面热源法基本属于同一类测试方法，不同之处是测量传感器由一维热线转变为二维热带和热盘，但它们的测试过程和测试过程基本相同，都是将测量传感器夹持在两块相同被测样品中间，测量样品的大小尺寸使得传感器发出的热脉冲能量不会控制在样品内，即相对于探测器和热功率假设被测样品为无限大测试模型，典型的

测量原理如图 2-4 所示。

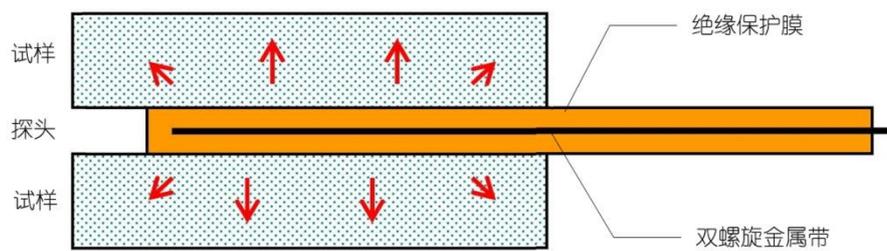


图 2-4 瞬态平面热源法 (HOT DISK 法) 测试原理图 (热线法和热带法类似)

瞬态平面热源法是一种绝对测试方法，由于瞬态平面热源法探测器是一种圆盘形式，传热更具有对称性，并与被测样品具有良好的接触，所以目前瞬态平面热源法的应用十分普遍，在合适的被测样品情况下，热导率测量可覆盖 0.01~400W/mK 范围，相应的标准测试方法为 ISO 22007-2。

闪光法是一种非接触式测量方法，测试过程中闪光脉冲照射被测样品前表面，使样品表面温度升高 1~5°C，通过红外探测器检测样品背面的温升变化，测量原理如图 2-5 所示。

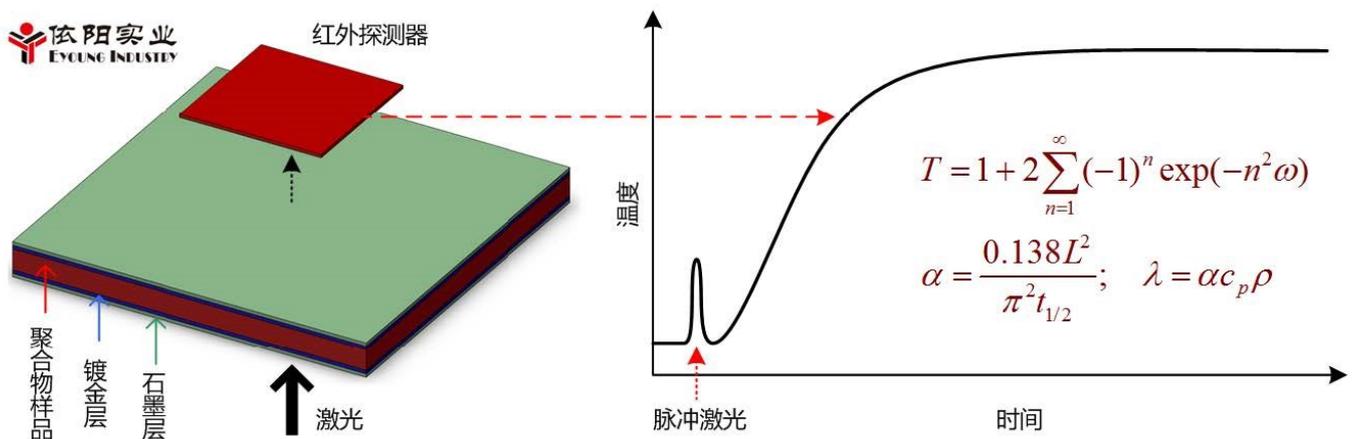


图 2-5 闪光法热扩散系数测量原理图

闪光法的最大特点是样品尺寸较小，最大直径不超过 25.4mm，最高测试温度可以达到 2800°C，可测量 1~500W/mK 范围的材料热导率，但闪光法只能直接测量热扩散率，然后通过其他方法得到比热容和密度，通过计算得到热导率。

### 3. 多孔金属材料热导率测试方法选择

从上述各种测试方法介绍中，可以采用排除法来选择哪种测试方法更适合多孔金属的热导率测量。

首先可以舍弃闪光法，这主要因为闪光法测试多孔金属热导率中存在以下严重缺陷：

(1) 闪光法是非接触测量方法，闪光热脉冲以非接触方式照射样品前表面，这势必使得很大一部分热脉冲会穿过样品空隙直接照射到样品内部，从而严重破坏样品前表面受热模型。另外红外探测器是以非接触方式测量样品背面温度，但由于孔隙的存在，探测器会探测到后表面一定深度的温度变化，这些因素都会造成无法得到合理的测量结果。

(2) 上述热脉冲和背温红外探测穿过空隙的问题，可以通过在样品的前后表面制作薄的实心表面来解决。但闪光法样品尺寸较小且薄，对于实体金属材料，闪光法要求样品厚度一般在 1~3mm 范围内，如果按照此厚度在多孔金属材料上取样，对于微小孔洞材料问题不大，而对于较大孔洞材料而言往往会造成被测样品不具有代表性问题，这是舍弃闪光法最重要的因素。

对于多空金属材料热导率的测量，其他瞬态法也可以舍弃，原因如下：

(1) 在热线、热带和热源法中，要求两块被测样品夹持探测器并形成良好的热接触。但由于多孔金属表面很难做到高精度的平整，势必在样品表面与探测器之间形成较大的接触热阻，而这种接触热阻还无法使用热界面材料来进行消除。

(2) 瞬态法测试中，若消除上述较大的接触热阻，需要在多孔金属的被测表面进行实心层处理。但在样品表面增加一层金属层后，瞬态法热脉冲会首先在此金属层内传递，然后再通过孔壁金属传递，由此测量得到热导率是金属层面内方向和多孔金属样品厚度方向的复合热导率，此复合热导率要比多孔金属厚度方向热导率大很多。

在稳态法中，保护热板法可以直接舍弃，原因如下：

(1) 为了保证测量精度，特别是为了保证一维热流和足够的护热空间尺寸，保护热板法对样品的尺寸要求普遍较大，常规商用仪器的样品尺寸为 300×300×20mm，最小也要 200×200×10mm，这种规格尺寸对多孔金属样品而言过于庞大。

(2) 为了减少保护热板法测试中的接触热阻，被测样品的平整度有严格要求，如平行度和平整度要小于 0.05mm，这对多孔金属材料样品的加工要求比较苛刻。

(3) 保护热板法一般用于测量热导率小于 1W/mK 的低导热材料，对于热导率通常大于 1W/mK 的多孔金属材料，样品厚度上的温差较小，保护热板法测量误差非常大。如要减少测量误差，就势必增大样品厚度，这又带来样品体积较大的问题。

通过上述分析，只剩下的稳态热流计法，热流计法在多孔金属热导率测试中主要有以下几方面的特点：

(1) 尽管热流计法是一种相对测试方法，但如果热流计进行了准确的校准，热导率的测试精度完全能够满足工程需要，相对测量误差可以控制在 $\pm 7\%$ 以内。

(2) 热流计法即可以用于各种尺寸大小样品的热导率测试。对于多孔金属材料，考虑到被测样品的代表性，可以采用图 2-3 所示的三种热流计法，样品尺寸可以控制在适中尺寸大小(如直径 50mm×高度 30mm)，由此可以满足不同孔洞大小的多孔金属材料测试。

(3) 采用热流计法，特别是采用块状热流计进行测量，样品两个端面温度可以控制在较小的温差范围内，在保证足够测量精度的温差要求外，这样可以最大限度的减小较大温差带来孔洞内的对流和辐射，可以测量纯基材的等效热导率。

(4) 由于多孔金属材料属于中等热导率材料，高温下热导率测试需要很复杂的护热机构，所以采用块状热流计法一般直进行 100℃以下（最高不超过 300℃）的测试。

#### 4. 测量准确性保障措施

通过上述分析，针对多孔金属材料的热导率测量，可以选择图 2-3 所示的三种测试方法和相应仪器。但在使用这些测试方法过程中，为保证测量准确性，必须采取以下保障措：

(1) 测试仪器一定要按照相应测试方法的规定制定相应的校准操作流程，校准流程必须是在线校准方式，不能将热流计取出进行离线校准，这是因为热流计安装后会存在一定的接触热阻，必须通过在线校准才能真正得到实际仪器测试过程中的热流测量值。

(2) 根据热导率测试范围和样品的可能厚度，换算出相应的热阻测量范围，选择至少三种已知热导率的参考材料，并按照不同厚度和不同温度来对应整个热阻范围，然后通过这些参考材料对热导率测试仪器进行校准，而且这种校准需要半年进行一次，以避免仪器使用一段时间后接触热阻的改变所带来的影响。

(3) 为了进一步保证多孔金属材料热导率测量的准确性，在对多孔金属样品进行完热导率测量后，最好对与被测多孔金属样品热阻近似且已知的实心样品（直径相同，但高度不同）进行对比测试。

(4) 如果多孔金属样品表面很难加工成平整表面，则要考虑将样品制成图 1-2 所示结构，即多孔金属样品的两个测试面上增加一层相同材质的金属薄层，对于大尺寸孔洞

样品这点尤为重要，否则会引入较大的接触热阻而使得热导率测量结果偏小。

## 5. 测试方法的改进

通过以上分析可以看出，尽管选择采用热流计法对多孔金属热导率进行测量，但还是存在以下不足：

(1) 热流计法需要繁复的校准过程，但测量精度还是不如保护热板法，这将非常不利于多孔金属材料的结构设计和精细优化。

(2) 热流法热导率测试设备整体结构还是复杂，能满足一定测量精度要求的测试仪器整体造价还是偏高。

(3) 能进行多孔金属热导率测试的热流计法导热仪普遍测试温度不高，无法满足目前和今后更高温度的测试需求。

为此，我们提出一种基于绝对稳态法热导率测量的崭新瞬态测试方法——热波法。热波法基于绝对稳态法，在样品冷面温度线性变化过程中，在样品热面加载设定功率和宽度的方波热脉冲，通过冷热面温差波形可以直接测量出样品热导率随温度的变化。

热波法作为一种瞬态法，但如果方波脉冲宽度变得无限大，则热波法就转变为典型稳态法，稳态法是热波法的一种特例。热波法作为一种绝对测试方法，其最大特点是测量精度高，且是在温度线性升降过程中连续扫描测量热导率，同时热导率测试范围宽泛（0.1~2000W/mK），测试温度范围宽泛（液氮温度~1000°C），测试仪器整体造价低，以及模块式结构可实现各种几何形状固态材料（薄膜、薄板、细棒、块体）的热导率测量。