

水流量平板法高温导热系数 测定仪升级改造技术方案

Technical Scheme of Upgrading High Temperature Thermal Conductivity Tester With Water Flow Plate Method

摘要：水流量平板法是目前常用的耐火材料导热系数测试方法，相应的导热仪具有测试温度高、大温差测量、结构合理简单、造价便宜和操作方便等突出优点，国内外用户众多，但存在的致命问题是测量低导热系数的隔热材料时误差巨大。针对水流量平板法导热仪，本文提出了一种改造升级方案，即采用一种高精度量热计技术代替现有的水量热计，彻底解决测量误差大的难题，在保留原有水流量平板法导热仪众多优势的前提下，实现导热系数测量精度大幅提高和测试时间大幅缩短，以满足各种高温隔热材料的低导热系数快速准确测量需求。

一、问题的提出

对于导热系数小于 0.03W/mK 的隔热材料，其高温范围（ 1000°C 以上）的导热系数准确测量一致都是没有很好解决的技术难题。但为了获得隔热材料的高温导热系数，并且出于测试设备的经济性考虑，很多国内外机构都选择了商业化的水流量平板法导热仪进行测试。

水流量平板法导热仪是一种依据标准测试方法的导热系数测试设备，相关标准如下：

- (1) 美国ASTM C201 “耐火材料导热性的标准测试方法”。
- (2) 英国BS 1902-505 “耐火材料导热系数标准测试方法（平板/水量热计法）”。
- (3) 冶金行业标准YB/T 4130-2005 “耐火材料导热系数试验方法（水流量平板法）”。

上述三个标准测试方法的基本原理完全一样，所采用的技术都是通过水量热计来测量流经样品厚度方向上的热流量。由于水量热计比较适用于较大的热流量测量，对于较小的热流量测量则存在巨大误差，因此这种测试方法比较适用于导热系数较高（大于 0.1W/mK ）的耐火材料。

由于水流量平板法导热仪可以进行温度达 1500°C 以上的高温导热系数测试，因此很多客户采用这种导热仪进行高温隔热材料的测试评价，由于测量误差巨大使得导热系数测试结果往往非常小，严重误导了材料的研发、生产和性能评价。目前国内主流的商品化水量热计法导热系数测定仪有如图1所示的几种规格，测试温度可以从 1200°C 到 1600°C 。

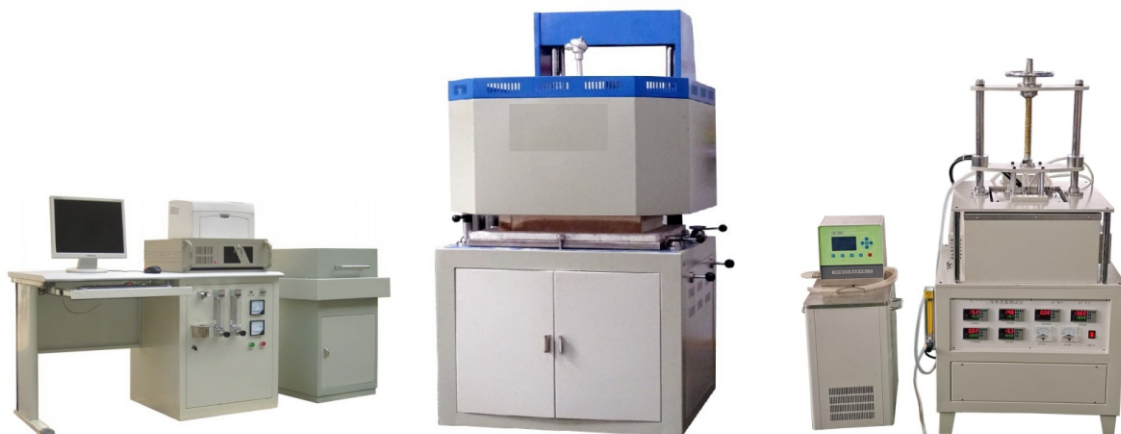


图1 国内常见的几种水流量平板法高温导热仪

尽管水流量平板法在高温导热系数测试中存在巨大误差，但随着量热分析技术的进步，可以对水流量平板法进行升级改造，可以通过提高量热计测量精度实现高精度的高温导热系数测量。选择水流量平板法导热仪进行技术改造，主要是因为水流量平板法导热仪具有以下便利特征：

(1) 水流量平板法导热仪的整体测试结构非常合理，高温加热加载在样品的顶面，水量热计位于被测样品的底面，从而在样品厚度方向上形成大温差，这非常符合隔热材料的实际使用工况，可以获得被测样品材料的等效导热系数。

(2) 样品顶面加热装置是一个独立的机构，可通过改变发热体材料实现不同的加热温度，由此可实现从1000℃至1500℃，甚至最高可达2000℃以上的高温，非常便于隔热材料高温导热系数的测量。

(3) 被测样品的装卸非常方便，并且可对不同尺寸的样品导热系数进行测试。

(4) 最重要的是水量热计位于测量装置的底部，更换水量热计比较方便，可以很容易的更换高精度量热计而不影响测量装置的整体结构。

(5) 水流量平板法导热仪的价格普遍很低，且国内用户众多。

基于上述特点，针对水流量平板法导热仪，本文将提出一种改造升级方案，即采用一种高精度量热计技术代替现有的水量热计，彻底解决测量误差大的难题，在保留原有水流量平板法导热仪众多优势的前提下，实现导热系数测量精度大幅提高和测试时间大幅缩短，以满足各种高温隔热材料的低导热系数快速准确测量需求。

二、现有量热计热流测试技术分析

在稳态法导热系数测试方法中，关键技术之一就是对流经样品的热流进行准确测量。热流测量的典型技术是量热计法，即基于量热计的比热容特性，通过测量量热计吸收或放出热量后的温度变化来确定所吸收或放出的热量多少。量热计在导热系数测试中有如下典型应用：

(1) 防护热板法：如图2 (a) 所示，防护热板法实际上是一种典型的绝热量热计法，热板作为样品热面温度的实施热源，其最终稳定温度就是完全吸收电加热功率后热板所升高的温度。因此，通过测量热板完全吸收的加热功率（即加载的电功率）就可以获得流经样品的热流。

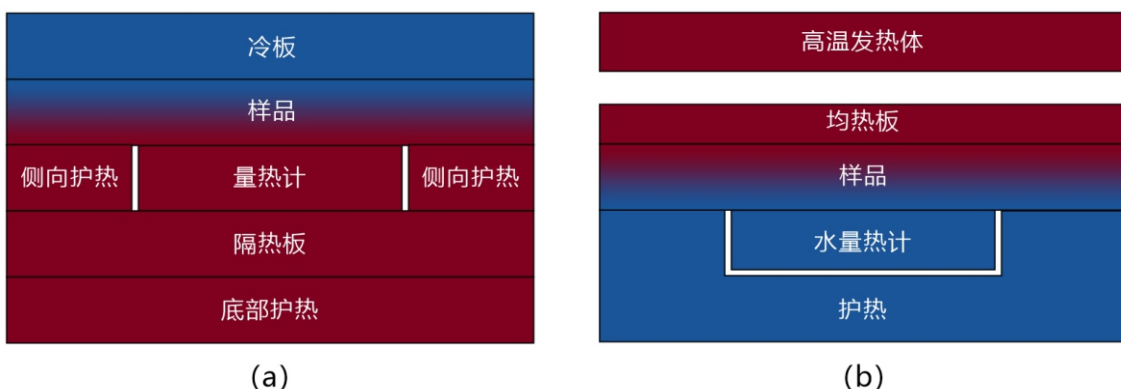


图2 量热计用于导热系数测试的两种测试方法示意图
(a) 防护热板法； (b) 水流量平板法

(2) 水流量平板法：如图2 (b) 所示，与防护热板法类似，也用的是量热计法，只是量热计位于被测平板样品的冷面来测量流经样品的热流。量热介质则是流动的液体，通过测量量热介质的温升，可根据量热介质的比热容计算得到量热介质吸收的热量大小。

从上述量热计在导热系数测量中的两个典型应用，可以做出以下分析：

(1) 防护热板法中采用的量热计技术，可以获得很高的导热系数测量精度。但由于需要使用护热技术使得量热计输出的热量只流经样品，即量热计周边处于一个高温动态等温绝热环境，而量热计自身还需处于高温状态，这使得量热计在高温下很难实现绝热防护和保证量热计尺寸的稳定性，因此防护热板法只能实现1000℃以下的导热系数准确测量。

(2) 水流量平板法是将量热计布置在被测样品的冷面，这样做的好处是样品冷面温度较低（特别是测试低导热系数隔热材料样品时），这样可以很容易实现较高样品热面温度。但带来的问题是如果样品冷面温度超过100℃，会使得水量热计中的流体产生沸腾蒸发而影响测量精度，如果通过增加水流速度避免流体沸腾蒸发，则会使得进出口之间的温差减小，也同样会带来另外的测量误差。同时水量热计四周较差的绝热防护措施而产生较大热损，会带来严重的测量误差。这些就是致使水流量平板法测量误差较大的主要原因，这些因素在高导热系数测量时还不明显，但在测量低导热系数时，测量误差所占比重则会很大，导热系数测量结果会明显偏低，甚至会有数量级水平的误差。

(3) 从上述两种量热计在导热系数测试的典型应用可以看出，两种量热计法测试都是在稳态状态下进行，每次导热系数测试都需要在样品冷热面温度和热流达到稳定状态。特别是对于高温范围的隔热材料测试，需要漫长时间进行多个温度点下的测量才能获得一条导热系数随温度变化曲线。

从上述分析可以看出，尽管水流量平板法存在测量误差巨大的严重缺陷，但在高温导热系数测量中则有巨大的潜力。只要克服水量热计存在的问题，就可解决低导热系数高温测量难题，因此问题的关键就是如何采用新型的量热计技术来代替目前的水量热计。

三、高精度金属块量热计解决方案

我们从最基本的物体吸收热量与温升的关系出发，即材料的比热容定义：单位质量物体升高一度所吸收的热量，可以设计出以下导热系数动态测试方法：

(1) 如图3所示，将图2 (b) 所示的水流量平板法导热仪中的水流量计更换为一平板金属块作为量热计，量热计上方的其他结构保持不变。

(2) 此金属块量热计采用高导热金属材料制成，用于吸收透过被测样品的热流量。采用高导热金属材料作为量热计是为了保证量热计温度能快速均匀，以满足测试模型中要求量热计始终处于等温的边界条件，同时具有耐高温能力，以能够进行高温下的导热系数测试。

(3) 由于金属块量热计的快速均温能力，那么通过量热计的温度变化就可以计算得到样品冷面的热流变化。

(4) 为了使金属块量热计所吸收的完全是透过被测样品的热量，最大限度减小量热计的热损失，借鉴了保护热板法的技术方案，即在金属块量热计四周增加了主动护热装置来实现绝热。

(5) 还继续采用原有水流量平板法导热仪的加热装置和温度测量装置，但加热装置的温度以线性方式进行变化，由此使得被测样品的冷热面以相同的升降温速率进行变化。通过上述测量得到的冷面热流变化，以及结合测量得到的冷热面温度和温度变化速率，可以得到整个温度变化过程中的导热系数变化曲线。

综上所述，只需对水流量平板法导热仪中的水量热计进行更换，即可实现绝热材料高温导热系数的准确测量，同时采用了线性升温加热方式，大幅缩短了测试时间。

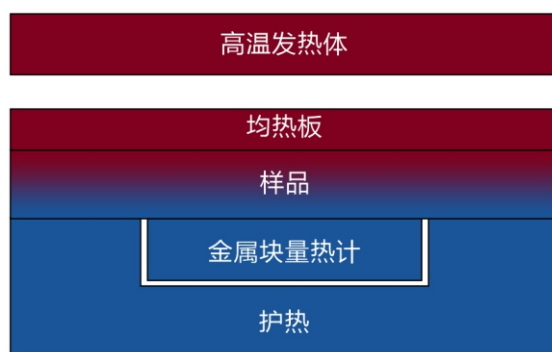


图3 金属块量热法高温导热仪结构示意图