

## 薄织物和隔热材料的热阻及导热系数测试中存在的问题

### Problems in Thermal Resistance and Thermal Conductivity Testing of Thin Fabrics and Thermal Insulation Materials

摘要：薄的织物和隔热材料的逐渐广泛应用，使得现有各种测试方法已经无法满足这些材料导热系数和热阻准确测试的要求。本文详细介绍了现阶段对这些低导热薄材料热导率测试中存在的错误现象，从测试方法方面分析造成这些问题的原因，为今后准确测量提供参考和借鉴。

#### 一、问题案例

隔热材料作为有效阻断热量散失材料在各个领域发挥着重要重要，特别是在服装行业，薄的隔热织物越来越得到了重视和发展，为人体保温抗寒提供了更轻便和更舒适的面料。

随着低导热薄织物的出现和技术发展，对薄织物的隔热性能，如导热系数和热阻，就提出了严峻的挑战，现有的各种测试方法都无法满足准确测量要求。

如国内某机构研制开发了一种新型隔热面料，开发目的是设法采用纳米孔技术来大幅度降低面料的导热系数。面料的厚度为 $0.75 \pm 0.1 \text{ mm}$ ，重量为 $48 \pm 2 \text{ g/m}^2$ ，体积密度为 $65 \pm 11 \text{ kg/m}^3$ ，孔隙率为96%以上，闭孔率为95%以上，孔径30~190微米，壁厚为20~180纳米，面料如图1所示。此面料经不同检测机构采用多种测试方法进行了测试评价，导热系数测试结果如图2所示。



图1 新型隔热面料

测试方法	测试标准	导热系数 (W/m·K)
纺织品蒸发热板法	GB/T11048-2008	0.00824
防护热板法	GB/T10294-2008	0.026
热流计法	GB/T 10295-2008	0.0223
瞬态法 薄膜模块	Hot Disk-TPS3500	0.024
瞬态法 基本模块单面	Hot Disk-TPS3500	0.016

图2 隔热面料导热系数测试结果汇总

从上述多种测试方法的导热系数测试结果可以看出，结果之间相差巨大，甚至出现了数量级的差别。特别是由纺织行业权威检测机构得到的超低导热系数测试结果 ( $0.00824 \text{ W/mK}$ )，严重误导了织物的提供方，织物提供方对这测试结果也表示怀疑，但检测机构也无法对测试的准确性进行核实。

如图2所示，该薄织物还采用其他测试方法进行了导热系数测试，尽管没有出现太离谱的测试结果，但测试结果之间还是相差较大，测试结果显示出的是完全不同的隔热能力。

鉴于上述混乱的导热系数测试结果，此织物的研发生产机构只能在官网上声明“导热系数是某某材料的核心数据。现有测试仪器和方法，无法测试出材料导热系数的绝对值。使用不同测试方法，供应用单位参考”。

这是一个非常典型的无法得到准确测试结果的案例，此现象在纺织行业普遍存在。为彻底解决此问题，本文将针对薄织物的导热系数测试，从测试方法方面分析造成测量不准确的原因，为今后进一步开展新型测试方法研究提供参考和借鉴。

## 二、薄织物和隔热材料导热系数测试方法分析

在图2所示的导热系数测试结果中，几乎用到了现有的大多数标准测试方法，下面将对现有的已经和可能用于薄织物和隔热材料导热系数测量的各种测试方法进行分析。导热系数测试方法主要分为稳态法和瞬态法两大类，本文分析的具体路线是从稳态法和瞬态法的源头开始，然后延伸到相应的拓展方法，以期对多个测试方法的整体轮廓有一个清晰的概念。

### 2.1 导热系数和热阻测试稳态法

#### 2.1.1 稳态护热板法和稳态热流计法

对于隔热材料导热系数测试，普遍采用的测试方法是经典的稳态护热板法 (GB/T 10294)。稳态护热板法作为一种绝对法具有最高的测试精度，并同时用来校准相对测试方法稳态热流计法 (GB/T 10295)，其测量原理如图3所示。

为保证测量准确性，GB/T 10294标准文本做出明确规定，规定试件热阻不应小于 $0.1 \text{ m}^2\text{K/W}$ ，规定用此来确定试件最小厚度。

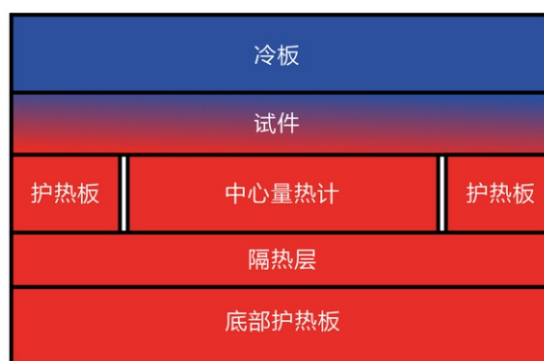


图3 稳态护热板法测量原理示意图

如果按照此规定，对于上述薄织物的 $0.75 \text{ mm}$ 厚度，薄织物相应的导热系数不应大于 $0.0075 \text{ W/mK}$ 才能符合规定。

对于试件最小厚度做出规定，是因为试件太薄后试件内部热流分布不均匀和热场变形，并会造成试件上的温差很小，相应的温度传感器测量精度会在小温差测量上产生很大误差。由此，在标准文本中指出：当试件热阻低于 $0.1 \text{ m}^2\text{K/W}$ 时，表面温度的测量需要使用特殊的方法。冷板、中心量热计和护热板的表面应机械加工或切削平整、平行且不能有应力，同时它们的温度均匀性要求很高。这些要求在现实中很难实现或实现造价很高，因此对于厚度小于 $1 \text{ mm}$ 的薄织物和隔热材料，稳态护热板法并不适合，很难满足导热系数准确测量的要求。

对于稳态热流法导热系数测试，相应标准GB/T 10295给出了相同的最小热阻 $0.1 \text{ m}^2\text{K/W}$ 规定，同样需要按照此规定来确定试件最小厚度。由此可见，稳态热流计法同样存在温差测量不准确等一系列很难克服的问题，对于厚度小于 $1 \text{ mm}$ 的薄织物和隔热材料，热流计法同样不适用。

当然，在不得已的情况下，可以将多层薄织物叠加成厚试件以增大被测试件热阻来测量薄织物的导热系数。这种多层叠加形式在理论上确实能够测量导热系数，但最大问题是叠加过程中会在被测试件中产生空气隙而引入接触热阻，从而使得被测试件的热阻值变大，导致导热系数测试结果偏小，所以一般情况下不推荐采用多层叠加形式进行稳态法测量，除非被测试件比较柔软。

#### 2.1.2 纺织品蒸发热板法

纺织品蒸发热板法是一种上述稳态护热板法的一种变形，其基本原理完全基于稳态护热板法，不同之处是将图3稳态护热板法中的试件用空气层和被测试件来代替，以模拟人体散热和外部空气散热条件。

纺织品蒸发热板法目前执行的标准为GB/T 11048-2018，在具体测试中，通过从测定试件加上空气层的热阻值中减去空气层的热阻值得出所测材料的热阻值。需要特别注意的是，蒸发热板法中的热阻值与稳态护热板法中的热阻值并不能等效，这主要是因为以下不同：

(1) 蒸发热板法在测试热阻时，试件冷面处于空气对流传热环境；而稳态护热板法测试热阻时，试件冷面处于与冷板的导热传热环境。两种测试方法尽管原理相同，但边界条件和物理意义完全不同，蒸发热板法测试的是模拟环境下的等效热阻，稳态护热板法测试的是纯热传导环境下的导热热阻，在稳态护热板法中，根据此导热热阻和试件厚度，可以准确得到导热系数。

(2) 蒸发热板法中被测试件是平放在中心量热计上，试件靠自身重量与量热计接触。而稳态护热板法中试件通过上面的冷板加载一定的力与量热计接触，两者所形成的热接触效果完全不同，稳态护热板法中的接触热阻更小，即蒸发热板法中得到的试件热阻含有较大的接触热阻。

(3) 在蒸发热板法标准GB/T 11048中，只涉及了织物热阻的测量，并未涉及通过厚度和测量得到的热阻来计算获得织物的导热系数。这基本就意味着蒸发热板法不能用来测量导热系数。

(4) 另外，在蒸发热板法标准GB/T 11048中，规定可测量的最小热阻不能小于 $2\text{m}^2\text{K/W}$ ，与稳态护热板法和热流计法规定的 $0.1\text{m}^2\text{K/W}$ 最小热阻相比高了20倍，即蒸发热板法比较适合较大热阻的测量。

根据上述分析，我们再来看图2得到的导热系数测试结果，就明显存在以下两大问题：

(1) 图2中的导热系数测量是依据GB/T 11048-2008，在此版本的蒸发热板法中，规定的热导率为热传导、热辐射和热对流的总和，是存在着三种传热形式的等效热导率，不能用此等效热导率与图2中的其他方法获得的纯导热传热过程的热导率相比较。

(2) 如果按照图2中的 $0.00824\text{W/mK}$ 导热系数计算结果和 $0.75\text{mm}$ 厚度可以反推出实际测量的热阻值，可得到热阻值为 $0.09\text{m}^2\text{K/W}$ 。显然此热阻值要远小于GB/T 11048-2008和GB/T 11048-2018中规定的最小可测热阻 $2\text{m}^2\text{K/W}$ 。

从上述分析基本可以得出结论，即蒸发热板法不适合测量薄织物的热阻，更不适合测量纯导热性质的导热系数，这也是GB/T 11048-2018不再提热导率这个参数的主要原因。

另外，检测机构出具图2所示的检测结果，也说明相关检测人员对标准方法GB/T 11048的适用范围还缺乏了解。

### 2.1.3 恒定热流法

恒定热流法是上述稳态热流计法的一种变形，其测量原理与稳态热流计法完全相同，同样采用了热流计来测量流经试件厚度方向上的热流密度，不同之处在于采用了独特的技术手段来测量薄试件厚度方向上的小温差，并且可以加载压力以保证较小的接触热阻和准确控制试件厚度。恒定热流计法的相应标准为ASTM D5470，这种方法普遍用于薄型导热胶垫和固态电绝缘板材的导热系数和热阻测量。

根据测量原理，恒定热流法应该比较适合薄织物和隔热材料的热导率和热阻的测量，但在具体测试过程中流经薄试件的热流密度很小，这就对热流密度测量精度提出了很高要求，现有执行标准ASTM D5470的测试仪器还无法实现如此小热流的准确测量，需要研发测量精度更高的测试设备以满足低导热薄片样品的测试要求。

## 2.2 导热系数测试瞬态法

### 2.2.1 瞬态平面热源法 (HOT DISK法)

在图2所示的薄织物导热系数测试案例中，显示了采用瞬态平面热源法 (HOT DISK法) 的测试结果。已经有很多研究并报道了这种方法在低导热系数测试中存在测试结果偏高很多的现象，这方面的详细介绍及其解决方案可在网上搜索上海依阳编写的《气凝胶隔热材料超低导热系数测试中存在的问题及解决方案》应用报告。

在瞬态平面热源法导热系数测试中，最大的问题是测量准确性无法进行考核。在稳态护热板法和热流计法中可以采用不同厚度标准参考材料来考核热阻的测量精度，而在HOT DISK法中只能测量热导率而无法测量热阻，那么对于导热系数低于标准参考材料数值 $0.03\text{W/mK}$ 的低导热材料，就根本无法考核其测量的准确性。

总之，瞬态平面热源法 (HOT DISK法) 也不适合测试低导热系数的薄织物和隔热材料。

### 2.2.2 闪光法

闪光法作为一种应用最为普遍的绝对法，广泛用于各种固体材料的热扩散系数测量。但闪光法对于薄织物和隔热材料并不适用，主要原因如下：

(1) 对于低导热的薄织物和隔热材料，隔热性能比较好，热阻比较大，闪光信号很难传输到样品背面，信噪比较差，测量误差较大。

(2) 薄织物和隔热材料，多为多孔材料且透光，闪光加热很容易穿透被测试件。如果对试件表面进行遮光处理，遮挡涂层很容易进入试件孔隙而改变试件的导热系数。

## 三、结论和今后工作

(1) 现有的各种导热系数测试方法，不论是稳态法还是瞬态法，都无法满足薄织物和隔热材料导热系数准确测试的需求。各种测试方法都有各自的局限性，没有一种完全适合低导热系数薄试件的测试方法。特别是目前用于纺织品热阻测量的GB/T 11048-2018测试方法，还存在很多问题，其中测量的热阻值应为等效热阻，是多种传热机理的复合作用结果，这很容易误导纺织品的开发人员。有关GB/T 11048-2018测试方法的更详尽研究分析，将在后续专文进行论述。

(2) 由于缺乏准确的测试方法，给新型织物材料的研究和研制带来的不便和困难，无法通过准确的热导率和热阻测量来调整材料的相应工艺。

(3) 对于薄织物和隔热材料的热导率测试，需要解决小温差和低热流密度精密测量难题，需要解决材料透光性的影响，这些都是今后工作的主要内容。

(4) 现有大多数采用稳态法的热阻和热导率测试仪器，所要求的样品尺寸太大，如大多采用面积为300mm×300mm的样品。对于薄织物和隔热材料的热导率测试，如果要想实现高精度测量，如此大的样品尺寸势必会增大测试仪器的护热、机加工和热应力变形等方面的技术难度和造价。因此，对于厚度小于1mm的被测样品，完全可以采用小尺寸样品，如50mm×50mm，同样可以保证稳态下的一维热流。

(5) 对于难度最大的小温差准确测量，可以借鉴闪光法而避开热导率的直接测量，可通过测量热扩散率来间接获得热导率，热扩散率的测量则可以采用频域技术，通过频域技术可以非常准确的将温差信号转换为频域信号。这可能将是今后的一个重要研究方向。

(6) 另外，表征薄织物的热性能参数中，除了导热系数和热阻之外，还涉及到人体触摸织物的冷感或热感表征参数：吸热系数。最好有新型测试方法能将这些热性能参数进行整体考虑和测试，为织物热性能提供完整的准确测试评价。