

隔热材料等效导热系数与导热系数的区别 以及高温大温差条件下的试验验证

Difference Between Effective Thermal Conductivity and Thermal Conductivity of Thermal Insulation Materials and Experimental Verification Under High Temperature and Large Temperature Difference Conditions

摘要：针对目前隔热材料导热系数测试中存在的使用条件和测试条件不一致，以及隔热材料导热系数测试方法选择不合理的问题，本文对低密度隔热材料导热系数测试技术进行了分析，介绍了等效导热系数和导热系数基本概念，介绍了如何选择合适的测试方法，并用试验测试数据验证了不同测试方法所得的等效导热系数和导热系数之间的差异。

一、问题的提出

在高低温隔热防护领域中，经常会听到防热结构设计人员和隔热材料使用机构提出隔热材料无法满足使用要求的问题，经常会出现隔热性能样品测试结果与实际隔热考核试验效果相差巨大的现象。在隔热材料实际应用中，如果按照隔热材料导热系数测试结果进行设计，经常会出现防隔热系统根本无法达到隔热设计要求的现象。出现这种现象主要是由于以下几方面的原因：

- (1) 隔热材料使用条件和测试条件出现严重偏离。
- (2) 隔热材料导热系数测试方法选择不合理。

为解决上述问题，本文将针对当前低密度隔热材料导热系数测试技术进行分析，介绍合理的测试方法选择，并用试验测试演示不同测试方法所得的等效导热系数和导热系数之间的差异。

二、等效导热系数、导热系数及其测试方法分析

各种隔热材料在实际应用中，一般都会在材料的隔热厚度方向上形成较大温差，即隔热材料的一面面对高温热源或低温冷源，隔热材料另一面经隔热后的温度越接近于环境温度（如室温）越好。在高温防隔热系统中，这种温差往往有几百至上千度；在低温绝热系统中，这种温差也会有200~300℃左右（如液氮和液氦冷源）。

另外在隔热过程中，隔热材料内部的传热形式主要有导热、辐射和对流三种传热形式，特别是对于低密度多孔隙的隔热材料，冷热面之间的温差越大，辐射和对流的作用越明显。因此，为了准确测试表征隔热材料的实际隔热性能，需要在隔热材料厚度方向上模拟出与实际应用接近的大温差后再进行测试，这种大温差条件下测试得到的导热系数包含了导热、辐射和对流三种传热形式的综合作用，这种包含了复杂综合传热效果的导热系数称之为等效导热系数（effective thermal conductivity），或表观导热系数（apparent thermal conductivity）。

目前大多数隔热材料导热系数测试过程中，并未在隔热材料厚度方向上形成较大温差，一般是将温差控制在10~40℃范围内，此时获得的测试结果为导热系数（thermal conductivity），也称之为真导热系数（true thermal conductivity），主要包括隔热材料内的固体材质和气体的导热系数之和，这种较小温差使得隔热材料内存在的辐射和对流热传递可以忽略不计。真导热系数的另外一个显著特点是与被测样品的厚度无关，即测试不同厚度的相同隔热材料样品应得到相同的真导热系数，此特点常用于考核导热系数测试仪器的准确性。

由此可见，由于小温差测试中不包含辐射和对流传热，这使得测试相同隔热材料测试时，大温差下测试得到的等效导热系数数值往往会普遍大于小温差下测试得到的真导热系数。因此，如果用真导热系数来进行防隔热系统的设计，自然无法得到合理的隔热设计效果。总之，为了得到隔热材料的真实准确数据，隔热材料的导热系数测试条件必须尽可能的与实际隔热温差接近。

依上所述，在隔热材料导热系数测试过程中，要根据隔热材料实际应用情况，导热系数测试设备要在被测样品厚度方向上建立相应的大温差或小温差，并在所建立的温差条件下进行测试。因此必须对测试方法和测试设备进行合理的选择，这样才能得到合理的隔热性能测试结果。

以下为几种常用于低密度隔热材料导热系数表征的测试方法以及它们的相应温差条件说明。

(1) 稳态保护热板法：稳态保护热板法是目前导热系数测量精度最高的一种稳态测试方法，也是一种绝对测试方法，其典型标准为GB/T 10294和ASTM C177，测试温度范围可以覆盖 $-160^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。由于这种方法在被测样品厚度方向上只能形成 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 的小温差，所以测试得到的是真导热系数。保护热板法适合测试导热系数小于 1W/mK 的各种低导热防隔热材料，但对于超低导热系数 ($<0.02\text{W/mK}$) 隔热材料测试，对测试仪器的漏热有更高的要求，微小漏热就会引起巨大误差。

(2) 稳态热流计法：稳态热流计法是基于稳态保护热板法的一种导热系数相对测试方法，其中使用的热流计需要采用稳态保护热板法或其他方法进行校准，热流计法测量精度受校准精度限制，其典型标准为GB/T 10295和ASTM C518，测试温度可以覆盖 $-180^{\circ}\text{C}\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 。由于稳态热流计法在被测样品厚度方向上可形成大温差，也可形成小温差，所以可根据测试温差大小分别得到等效导热系数和真导热系数。热流计法适合测试导热系数小于 1W/mK 的各种低导热防隔热材料，但对于超低导热系数 ($<0.02\text{W/mK}$) 隔热材料测试，要求更高灵敏度和测量精度的热流计，同时对热流计校准提出了更高要求，否则测量误差巨大。

(3) 准稳态法：准稳态法是基于量热技术的一种导热系数相对测试方法，其中使用的量热计需要进行校准，准稳态法测量精度受校准精度限制，其典型标准为ASTM E2584，测试温度可覆盖 $4\text{K}\sim 3000\text{K}$ 。由于准稳态法在被测样品厚度方向上可形成较大温差，所以测试得到的是等效导热系数，同时还可以得到等效热扩散系数和比热容。同样，准稳态法适合测试导热系数小于 1W/mK 的各种低导热防隔热材料，但对于超低导热系数 ($<0.02\text{W/mK}$) 隔热材料测试，对量热计的漏热有更高的要求，微小漏热就会引起巨大误差，同时对量热计校准提出了更高要求，否则测量误差同样巨大。

(4) 蒸发量热计法：蒸发量热计是基于液体低温介质（如液氮和液氦）受热蒸发为气体的基本原理，通过测量稳态时蒸发气体的流量可精确的测量穿过隔热材料的传热热流。蒸发量热计法是一种绝对测试方法，其典型标准为ASTM C1774。由此采用低温介质和高灵敏度，蒸发量热计法适用于低温下 ($4\text{K}\sim 300\text{K}$) 低导热系数和超低导热系数 ($0.03\sim 0.003\text{W/mK}$) 的绝热材料，另外由于存在较大温差，所以测试得到的是等效导热系数。这种方式是稳态防护热板法的一种变形，与稳态护热板法一样，对于超低导热系数 ($<0.02\text{W/mK}$) 隔热材料测试，对测试仪器的漏热有很高要求，微小漏热就会引起明显误差。

(5) 瞬态热线法、热带法和热盘法（瞬态平面热源法）：瞬态法是基于给热线、热带和热盘恒定电流进行温度扰动和测量导热系数的一种绝对测试方法，其典型标准为ASTM D5930和ISO 22007-2，测试温度可覆盖 $-180^{\circ}\text{C}\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 。由于瞬态法要求被测样品温度均匀，且热扰动引起的温度变化很小，所以测试得到的是真导热系数。瞬态法适合测试导热系数小于 1W/mK 的各种低导热防隔热材料，但对于较低导热系数 ($<0.03\text{W/mK}$) 的测试，需要进行传感器和保护膜热容以及热响应时间的复杂修正，否则导热系数测试至少偏高10%以上。

(6) 闪光法：闪光法作为一种典型的瞬态法，是在被测样品表面加载脉冲加热并检测样品背面温升变化。闪光法同样是一种绝对测试方法，其典型标准为ASTM E1461和ISO 22007-4，测试温度可覆盖4K~3000K。由于闪光法要求被测样品温度均匀，且脉冲加热引起的样品温度变化小于5°C左右，所以测试得到的是真导热系数。闪光法适合测试导热系数大于0.5W/mK的各种材料，并不适用于较低导热系数的低密度隔热材料测试，低导热材料闪光法测试要求样品很薄才可能有微弱的可探测背温，但薄样品缺乏取样代表性，测试结果的重复性很差。对于隔热材料而言，更多情况下很薄样品时闪光法也无法获得背温信号。

通过上述分析可以看出，并不存在某一种测试方法可以覆盖所有温度和满足所有要求。但对于低导热隔热材料，特别是对于各种低密度隔热材料，为了满足实际应用中对高低温测试温度范围和大温差等效导热系数测试要求，比较合适的测试方法是稳态热流计法、准稳态法和蒸发量热计法，本文主要推荐以下两种测试方法。

(1) 在高低温隔热材料导热系数 ($>0.01\text{W/mK}$) 测试中，准稳态法的表现显著尤为突出，这主要是因为准稳态法具有从低温至高温的很宽泛测试温度范围，并能测试大温差下的等效导热系数，同时配套的校准技术相对简单，并具备多参数（导热系数、热扩散系数和比热容）测试能力和更快的测试效率，另外准稳态法测试设备具有相对较低的造价。

(2) 对于具有超低导热系数 ($<0.01\text{W/mK}$) 的绝热材料，其常温至低温下导热系数测试推荐采用蒸发量热计法，一方面是因为这种方法灵敏度和准确度都非常高，另一方面是可以测试大温差下的等效导热系数。

三、等效导热系数和导热系数测试对比

为了更直观的说明和了解等效导热系数与导热系数之间的区别，我们分别对石墨毡隔热材料在高温和真空下分别采用不同稳态热流法法和稳态防护热板法进行了测试验证。

样品：石墨毡，样品尺寸300mm×300mm×30mm，密度91.7kg/m³。

测试环境：真空环境，真空度始终控制在100Pa左右。

测试方法和设备：

(1) 稳态保护热板法 (ASTM C177)，测试设备为德国耐驰公司的GHP 456,如图1所示。样品热面最高温度为620°C，样品厚度方向上的温差为20°C。

(2) 稳态热流计法 (ASTM C518)，测试设备为上海依阳公司的TC-HFM-1000,如图2所示。样品热面最高温度为1000°C，冷面温度控制在50°C以上，最大温差980°C。



图1 德国耐驰公司GHP 456导热测试设备



图2 上海依阳公司TC-HFM-1000导热测试设备

采用热流计法和保护热板法得到的测试结果如表1所示，绘制成拟合曲线如图3所示。

表1 采用热流计法和保护热板法测试石墨毡导热系数结果

热流计法测试结果				保护热板法测试结果	
冷面温度 ℃	热面温度 ℃	平均温度 ℃	等效导热系数 W/mK	平均温度 ℃	导热系数 W/mK
22	200	111	0.059	25	0.062
24	400	212	0.079	200	0.089
28	600	314	0.114	380	0.130
35	800	417	0.160	600	0.175
48	1000	524	0.256		

从上述测试结果可以明显看出，保护热板法在20℃小温差下测得的导热系数随温度变化基本呈线性关系。热流计法在大温差下测得的等效导热系数随温度变化呈曲线关系，并随着温差增大，导热系数快速增大，其中的热辐射传热效应非常明显。在500℃平均温度下，等效导热系数要比真导热系数增大了将近60%多。由此可见，如果在隔热系统中采用的是导热系数而非等效导热系数进行设计，则会出现严重错误。

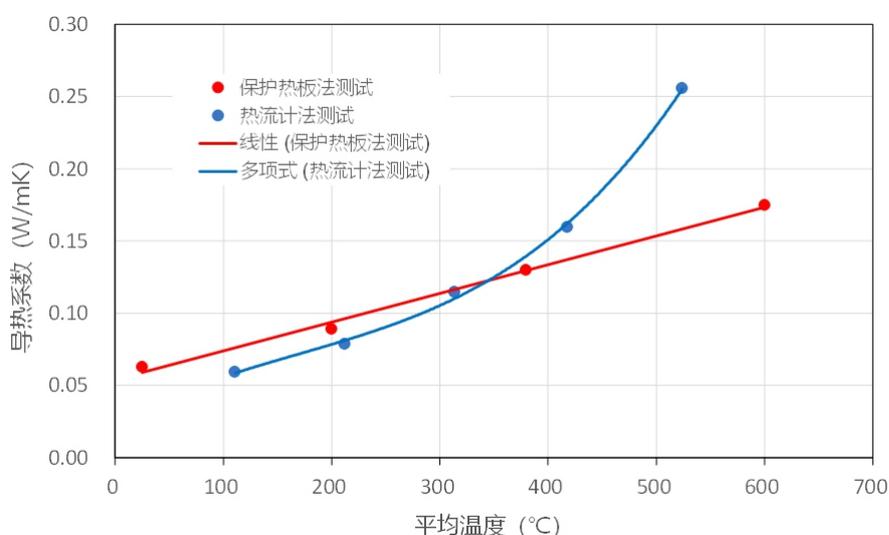


图3 石墨毡等效导热系数和导热系数测试结果对比图

四、总结

为了满足实际工程应用中对隔热材料的隔热性能准确测试表征，需特别注意以下内容：

(1) 根据隔热材料的设计和应用场景，选择合理的测试方法，相应测试方法和测试设备要求具备模拟隔热材料实际应用中高温下的大温差能力。

(2) 为同时实现大温差和尽可能高的测试温度，推荐的测试方法为热流计法和准稳态法。

(3) 对于超低导热系数绝热材料（如气凝胶类隔热材料）的测试，要仔细考量和解决热流计的校准问题和准稳态法中量热计的漏热问题。

(4) 稳态保护热板法是目前热流计校准唯一较准确的方法，为了实现对超低导热系数测试中更小热流的准确测量，势必要大幅度降低保护热板法校准设备的微小漏热问题，但此问题的解决难度大，现有技术基本已经达到了极限，从而造成目前所有超低导热系数测试普遍偏高的现象。因此迫切需要在新技术上有所突破，解决微小漏热难题，特别是在高灵敏度热流计和微小热流精密校准方面取得突破。