

## 稳态法热导仪超低导热系数测试 下限的评估方法和试验验证

### Evaluation Method and Experimental Verification of the Lower Limit of the Ultra-Low Thermal Conductivity Test of the Steady-State Thermal Conductivity Meter

摘要：针对气凝胶和超级绝热材料（VIP）等超低导热系数材料的测试，常用的稳态法热导仪往往会在测量精度和灵敏度方面表现出不足。为考核稳态法热导仪的超低导热系数测试能力，本文提出了一种简便可行的考核方法，通过对一系列不同厚度的样品进行导热系数测试，最终根据导热系数随厚度的变化来判断和考核稳态法热导仪的导热系数测试下限，以准确掌握稳态法热导仪的测试能力，为正确使用和改进热导仪提供参考和指导。

## 一、问题的提出

在隔热材料的研发和生产过程中，隔热材料的导热系数测试结果经常会受到质疑，特别是隔热材料导热系数小于空气（0.026W/mK）的气凝胶和超级绝热材料（VIP），这些超低导热系数的测试结果往往存在较大误差。隔热材料低导热系数的测试普遍采用稳态法（防护热板法和热流计法），对应于低导热系数测试不准确现象，相应的稳态法热导仪往往会存在以下问题：

（1）稳态法热导仪的测量精度和灵敏度不够，无法准确测量低导热和超低导热系数，无法准确测量超低导热系数以及导热系数的微小变化，无法满足材料研发和生产中工艺和配方调整和评价需要。

（2）由于缺乏导热系数在0.02W/mK左右（或更低）的标准参考材料，对于已有的稳态法热导仪，如何判断仪器的低导热系数测试能力，由此来大致判断测量结果的准确性。

为解决上述问题，本文将提出一种简便可行的考核方法，通过对一系列不同厚度的隔热材料样品进行导热系数测试，根据导热系数随厚度的变化情况来判断和考核稳态法热导仪的导热系数测试下限，以准确掌握稳态法热导仪的测试能力，为正确使用和改进热导仪提供参考和指导。

## 二、评估方法和考核试验

考核试验的依据是稳态法的导热系数测试结果不应随样品的厚度而发生而改变，如果发生改变，则说明导热系数测试产生误差。由此可用来判断热导仪的误差范围和测试极限。

气凝胶软毡考作为考核试验样品，单层软毡厚度略大于10mm，通过多层叠加来实现不同厚度。测试采用了热流计法热导仪，样品为300mm边长的正方形，样品厚度分别为10、20、30、40和50mm，样品的平均温度为30℃，冷热面温差为20℃，结果如图1所示。

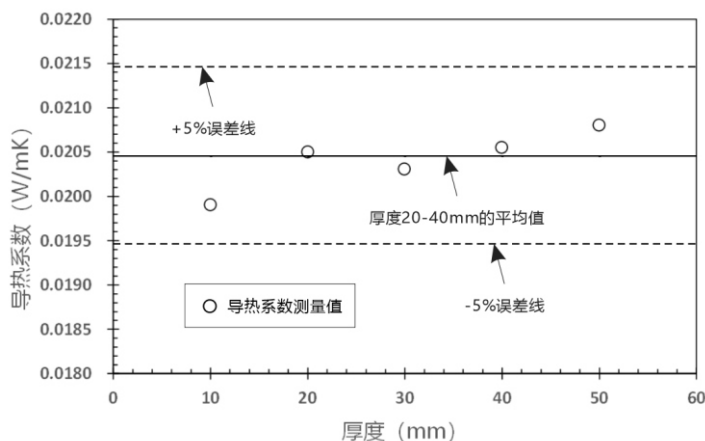


图1 不同厚度气凝胶软毡导热系数测试结果

从图1测试结果可以看出，在厚度20~40mm范围内，测试结果不会随厚度变化而改变，导热系数平均值为0.02045W/mK。随着厚度降低到10mm，导热系数测试结果有变小的趋势，此时说明样品太薄使得厚度测量和厚度均匀性给样品内部热流场均匀性所带来的误差影响变大。

从图1测试结果还可以看出，当厚度增大到50mm时，导热系数测试结果有变大的趋势，这种现象说明随着样品厚度的增大，样品热阻也随之增大，稳态时流经样品厚度方向上的热流量变小，热流传感器对小热流的测量出现误差变大的现象。同时样品厚度增大使得样品内部热流场均匀性所带来的误差影响变大。

在图1所示的测试结果中，尽管对薄样品和厚样品的测试结果偏离了平均值，但偏差还是没有超出导热仪的 $\pm 5\%$ 的误差范围，这证明了此热流计法导热仪完全具备准确测试 $0.02\text{W/mK}$ 导热系数的能力。

### 三、导热系数测试下限分析

根据上述考核试验测试得到相同材料不同厚度下的导热系数，可以依据傅里叶稳态传热定律推算出流经样品的热流密度，如表1所示。如果假设热流计法导热仪中热流计的灵敏度为 $10\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ，那么就可以得到相应的热流计电压输出值。这里选择 $10\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ 作为热流计的灵敏度，是因为目前普遍的热流计灵敏度都在这个数值以下。另外，选择此灵敏度主要仅是为了更方便的描述如何进行导热系数测试下限判定，其他灵敏度也能说明问题。

表1 根据不同厚度样品的热导率测试结果推算出的热流密度和热流计电压输出值

样品厚度 (mm)	冷热面温差 ( $^{\circ}\text{C}$ )	热导率 ( $\text{W}/\text{mK}$ )	热阻 ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )	热流密度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	电压值 ( $\mu\text{V}$ )
10	20	0.0199	0.50	40	398
20	20	0.0205	0.98	21	205
30	20	0.0203	1.48	14	135
40	20	0.0206	1.95	10	103
50	20	0.0208	2.40	8	83

按照傅里叶传热定律，如果假设样品的导热系数保持不变并与样品厚度无关，那么随着样品厚度增加，样品热阻会线性增大，流经样品的热流密度会线性减小，对应的热流计输出信号（电压值）也会线性减小。从表1的推算结果也显示了这种变化过程，但不同的是由于热流计电压输出测试仪表的测量精度有限，在大厚度、高热组和小热流密度时，电压信号测量会带有明显误差。由此可见，在低导热系数测试中，主要测量误差来源是热流计的灵敏度。

根据表1，如果假设 $103\mu\text{V}$ 是电压测试仪表的准确测量下限，对应 $10\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ 灵敏度的热流计，热流计准确测量热流密度的下限为 $10\text{W}/\text{m}^2$ ，可准确测量的最大热阻为 $1.95\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ 。由此，可以根据这个可测热阻值 $1.95\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ，推算出20mm最佳厚度样品的可准确测量的最低导热系数为 $0.02/1.95=0.0102\text{W}/\text{mK}$ 。如果设定可接受的误差范围为 $\pm 5\%$ ，那么 $10\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ 灵敏度的热流计法导热仪，其测试下限为 $0.0102 \times 0.95=0.0097\text{W}/\text{mK}$ ，约为。

由此可见，上述的热流计法导热仪的导热系数测试下限基本为 $0.01\text{W}/\text{mK}$ ，且误差在5%的误差范围内。那么对于真空绝热材料（VIP），这类材料的导热系数一般在 $3\sim 8\text{W}/\text{mK}$ 之间，那么用此灵敏度的导热仪测试将会带来巨大误差。由此可见，为了保证测量超低导热系数的绝热材料，必须进一步提高热流计的灵敏度。由此也可以得出同样的结论，采用稳态保护热板法导热仪测量超低导热系数，关键之一是必须进一步降低护热板的漏热。

### 四、总结

对于稳态法热导率测试，通过对一些列不同厚度但材质相同的样品进行测试，可以大致判断出稳态法热导率测试仪器的测试能力，特别是判断导热仪是否具备超低导热系数测试的能力，并用此方法对稳态法导热仪进行考核。