

## 真空环境中接触热阻对热导率 测试的影响

Thermal Resistance Effect for the Measurement of Thermal  
Conductivity in Vacuum Condition



摘要：针对真空环境下热导率测试过程中遇到的试样接触热阻对热导率测试的影响，验证接触热阻对热导率测试影响的严重程度，进行各种材料的测试和对比，寻求解决方法并通过试验来验证减小热阻方法的可行性和有效性。

## 1. 问题的提出

在研制完成低温高真空环境材料热物理性能测试系统后，开始进行各种材料热导率的测试。低温高真空材料热物理性能测试系统如图 1 所示，低温高真空腔体如图 2 所示。在测试过程中发现在一定真空度下热导率测试非常不准确，甚至测试结果非常怪异，真空度会使得试样接触热阻发生巨变而严重影响热导率测试。



图 1 低温高真空环境材料热物理性能测试系统

为了验证试样接触热阻的影响，针对不同表面状态和硬度的材料进行了验证试验，但选择验证试样的原则是真空度不能造成试样本身的热导率发生变化。



图 2 低温高真空腔体

### 1.1. 不同真空度下接触热阻对不锈钢试样热导率测试的影响

首先采用表面光滑的刚性金属材料进行验证。如图 3 和图 4 所示，将一对已知热导率的不锈钢参考材料放入真空腔内，分别进行常温和不同真空度下的热导率测试，测试结果如图 5 所示。



图 3 已知热导率的被测不锈钢试样



图 4 不锈钢试样测试状态

从图 5 所示的测试结果可以看出，在真空度变化前期（真空度大于 5000Pa），热导率测试结果还是十分准确和稳定。随着真空度的提高，小于 2000Pa 时的测试结果明显开始降低，在小于 1000Pa 后测试结果出现波动甚至无法获得有效的热导率测试数据。这就意味着随着真空度升高，试样与探测器之间的接触热阻逐渐增大，最终巨大的接触热阻和接触热阻分布的

不均匀完全破坏了瞬态平面热源法传热测试模型，导致根本无法进行测量。

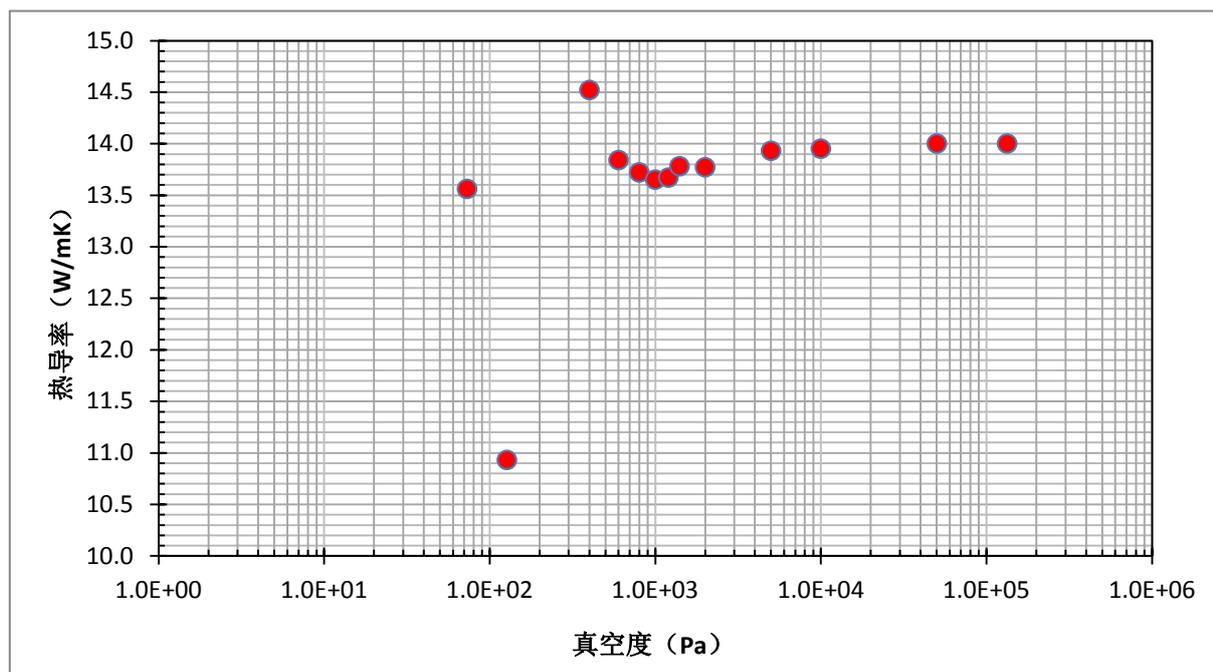


图 5 不锈钢试样常温不同真空度下的热导率测试结果

## 1.2. 不同真空度下接触热阻对低导热硬质泡沫塑料试样热导率测试的影响

上述验证试样所选的不锈钢热导率在  $14\text{W/mK}$  左右,为进一步验证试样接触热阻的影响,我们选择了硬质聚氨酯泡沫塑料进行考核。选择硬质聚氨酯泡沫塑料一是因为这种材料的热导率很低,热导率在  $0.04\text{W/mK}$  左右;二是因为这种材料是闭孔材料,闭孔率在 90%以上,材料热导率随真空度的变化不大。

如图 6 和图 7 所示,将一对硬质聚氨酯泡沫塑料试样放入真空腔内,分别进行常温和不同真空度下的热导率测试,测试结果如图 8 所示。

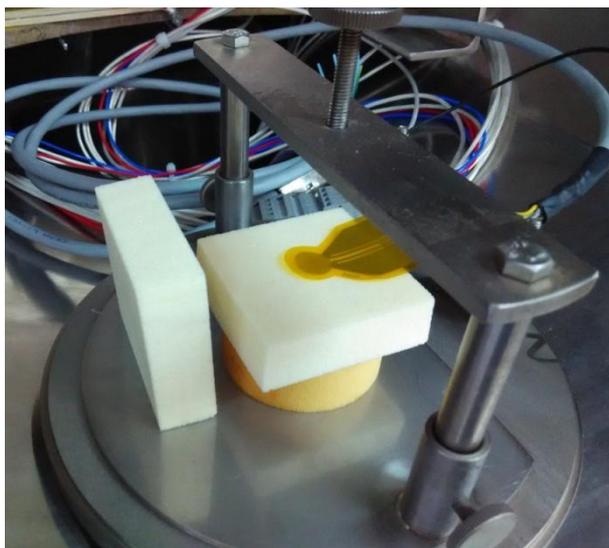


图 6 被测硬质聚氨酯泡沫塑料试样

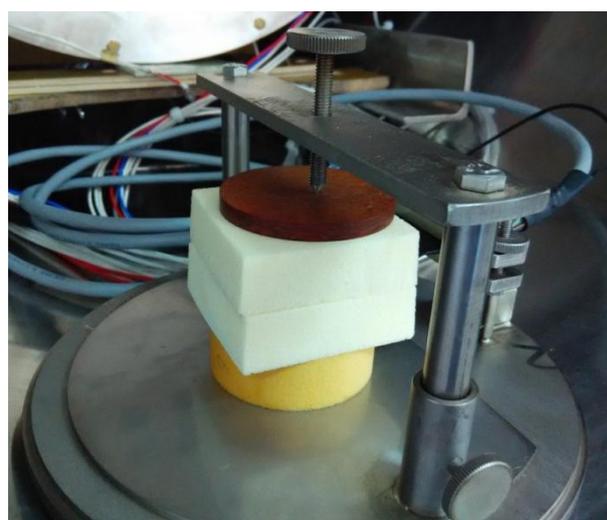


图 7 硬质聚氨酯泡沫塑料试样测试状态

从图 8 所示测试结果可以看出,随着真空度升高,热导率数值逐渐降低,最终在真空度升高到  $5\text{Pa}$  时,热导率从常压下的  $0.0447\text{W/mK}$  降到了  $0.0337\text{W/mK}$ ,减小了近四分之一。

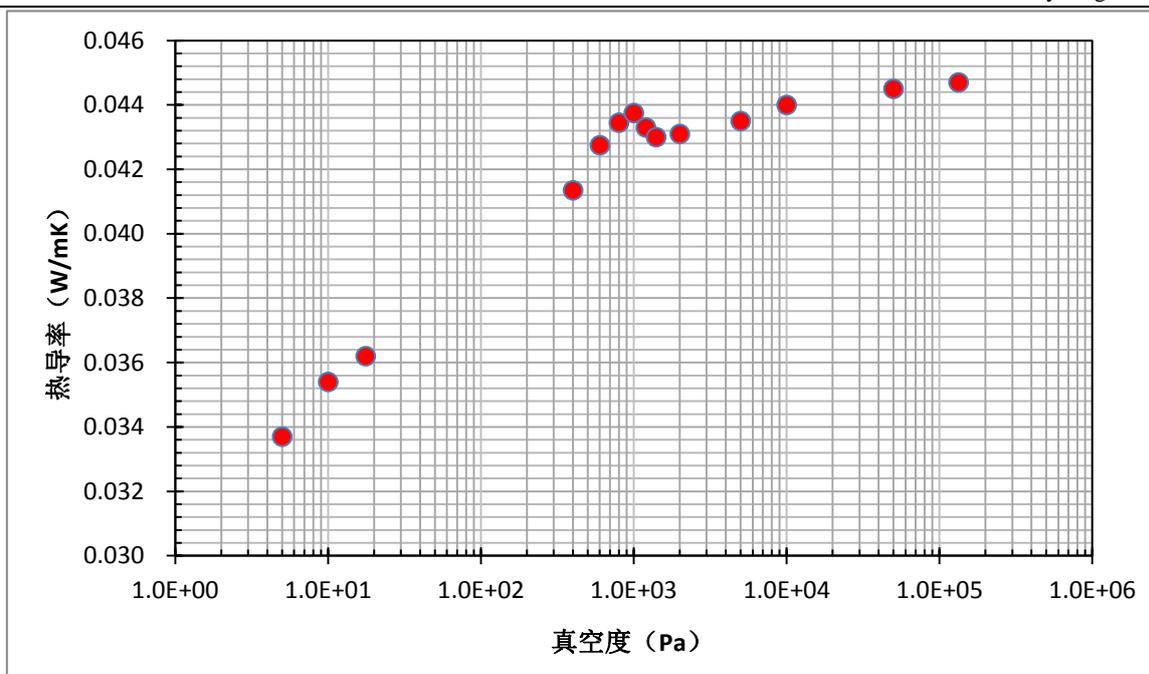


图 8 硬质聚氨酯泡沫塑料常温不同真空度下的热导率测试结果

随着真空度的升高，引起聚氨酯泡沫塑料热导率降低主要有两个原因：

(1) 试样内的部分开孔随着真空度升高而降低热导率，但由于开孔率较低，这种影响不是主要因素。

(2) 尽管聚氨酯泡沫塑料属于硬质材料并便于加工，但试样的表面粗糙度还是远大于表面光滑的不锈钢试样，所以接触热阻是热导率降低最主要因素。

### 1.3. 测试结果分析

由以上两种材料的测试，可以得出以下初步的结论：

(1) 对于瞬态平面热源法这种试样与探测器夹心测试结构，测试过程中随着真空度的升高，探测器与试样之间的接触热阻会明显增大，这种热阻的增大会给热导率测量带来影响。

(2) 试样与探测器之间的接触热阻并非均匀分布，随着真空度升高，这种非均匀分布的接触热阻会完全破坏传热测试模型，造成测试结果完全不正确，甚至根本无法进行测量。

(3) 由于试样表面粗糙度不同，真空度对接触热阻的增加幅值也不相同。如果假设接触热阻等效为一个均匀分布热阻层，接触热阻给热导率测试所带来的影响假设为一个等效热导率，那么在一般情况下，这个热阻层的等效热导率大小为 0.01W/mK 量级。

(4) 这种由于真空度升高引发的试样接触热阻增大的现象，是所有真空环境下固体界面热传导中存在的普遍现象。因此，如果不采取一定措施，真空下的试样接触热阻不仅会严重影响瞬态平面热源法的热导率测量，也好严重影响其它所有热导率测试方法的测量准确性。

## 2. 解决方案

为了降低和消除真空环境下试样接触热阻对热导率测量结果的影响，最有效的方法就是采用薄的柔性填充物来填充试样与探测器之间的空隙，把真空度的影响降低到最小。

为此，我们选用了填充物为导热硅脂、导热硅胶片和镜头纸分别进行试验，以其找到有效的材料和方式。

### 3. 试验验证

#### 3.1. 不锈钢参考材料填充导热硅脂的试验验证

还是采用表面光滑的刚性金属材料进行验证。如图 9 和图 10 所示，将一对已知热导率的不锈钢参考材料测试表面分别涂覆了一层导热硅脂。常温常压下导热硅脂的热导率为  $3\text{W/mK}$ ，这也是目前热导率比较高的导热硅脂，从理论上来说，导热硅脂的热导率越大约好。将涂覆了导热硅脂的试样与探测器夹紧并放入真空腔内，分别进行常温和不同真空度下的热导率测试。添加导热硅脂前后的测试结果对比如图 11 所示。



图 9 涂覆导热硅脂的已知热导率被测不锈钢试样



图 10 涂覆导热硅脂后的不锈钢试样测试状态

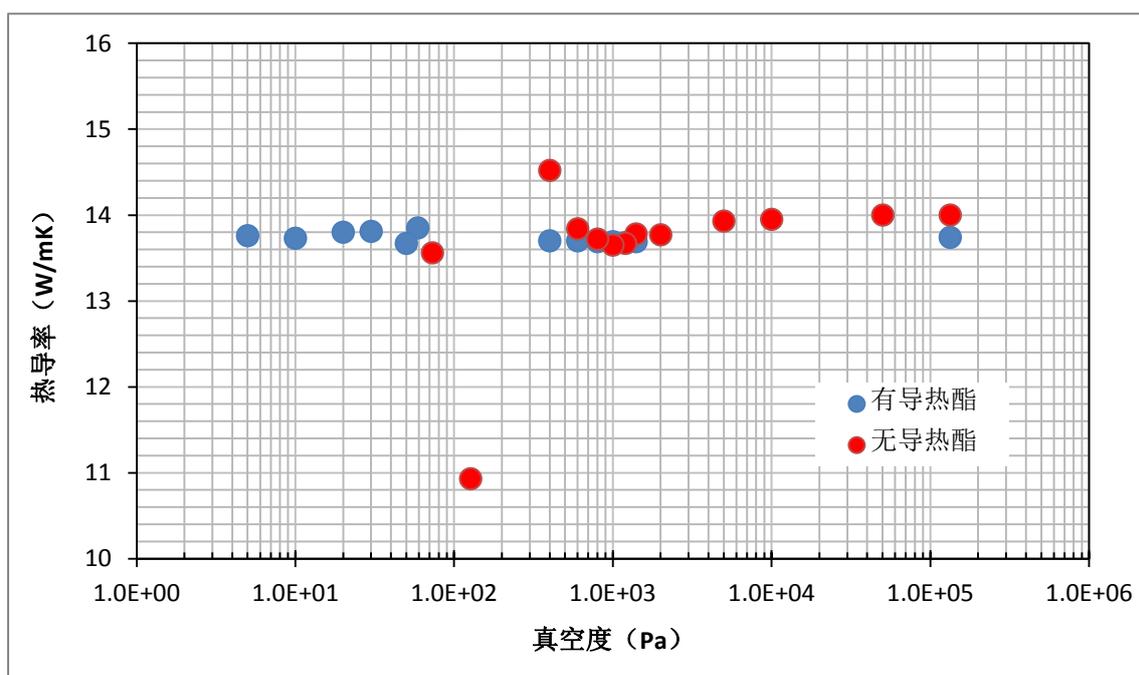


图 11 添加导热硅脂前后不锈钢参考材料热导率测试结果对比

从图 11 所示的热导率测试对比结果可以明显看出，在添加导热硅脂后，在不同真空度下的热导率测试结果始终比较稳定，并没有受到真空度变化的影响。但另一方面，添加导热硅脂后，热导率测试结果要比标准值低 2% 左右，但这个误差还是在瞬态平面热源法热导率测试误差允许范围之内。

### 3.2. 硬质聚氨酯泡沫塑料填充导热硅脂的试验验证

如图 12 和图 13 所示，将一对试样测试表面分别涂覆了一层导热硅脂。常温常压下导热硅脂的热导率为 3W/mK。将涂覆了导热硅脂的试样与探测器夹紧并放入真空腔内，分别进行常温和不同真空度下的热导率测试。添加导热硅脂前后的测试结果对比如图 14 所示。

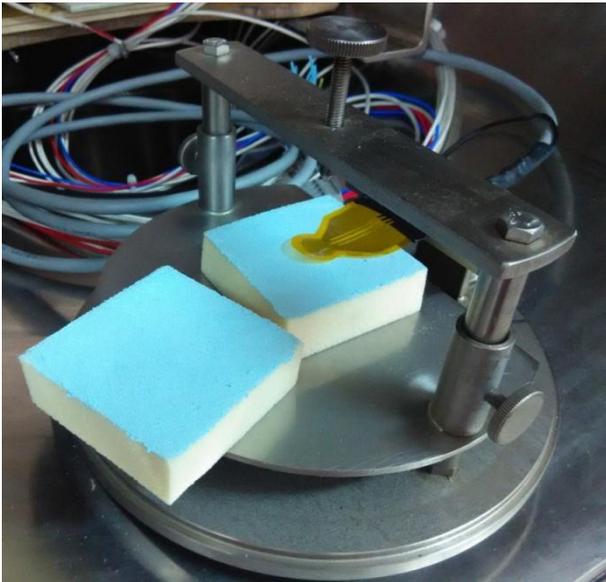


图 12 涂覆导热硅脂的硬质聚氨酯泡沫塑料试样

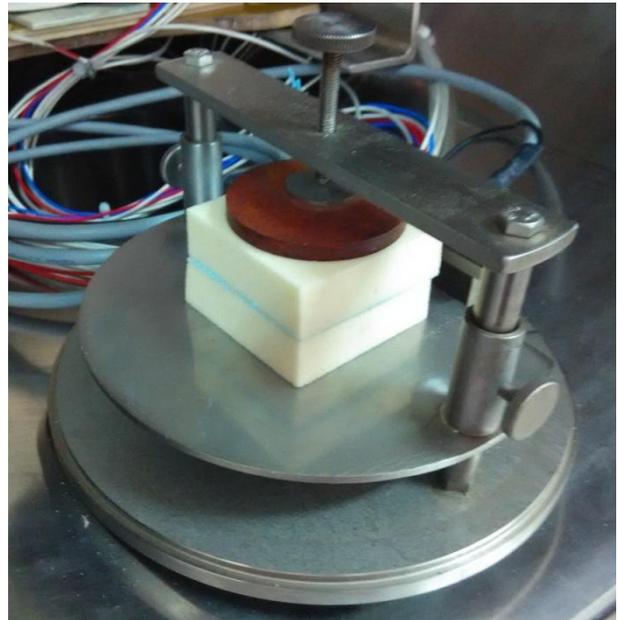


图 13 涂覆导热硅脂后的硬质聚氨酯泡沫塑料试样测试状态

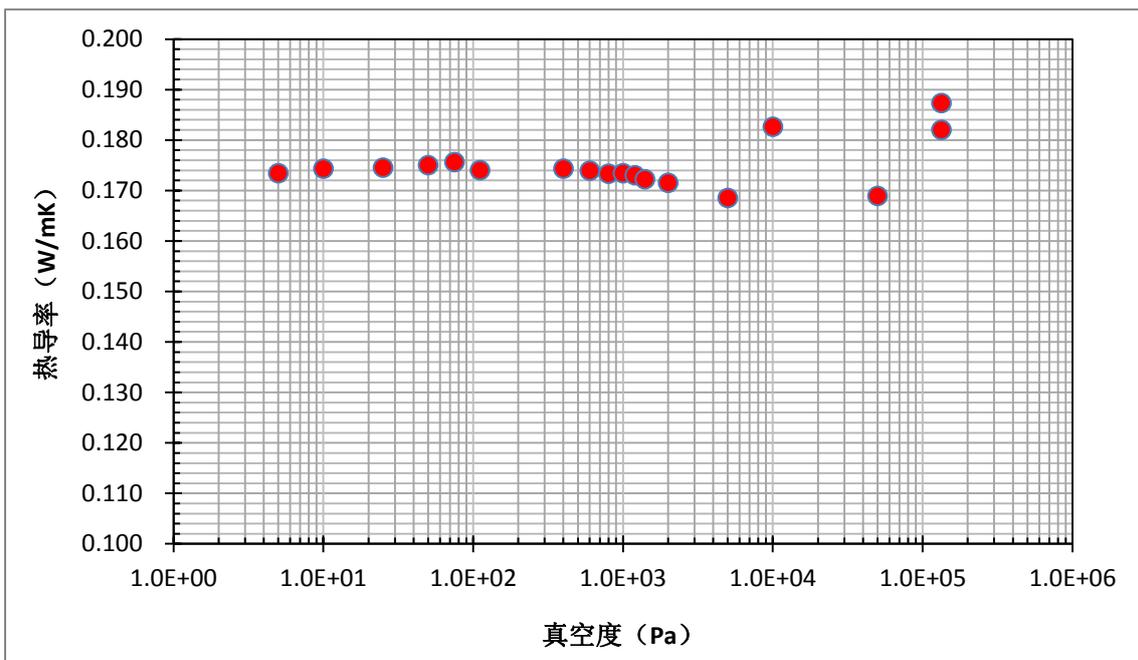


图 14 添加导热硅脂后硬质聚氨酯泡沫塑料热导率测试结果

从图 14 所示的热导率测试结果可以看出，在添加导热硅脂后，硬质聚氨酯泡沫塑料的热

导率达到了近  $0.17\text{W/mK}$  左右,比未填充导热硅脂时的测试结果  $0.044\text{W/mK}$  增大了近 4 倍多。尽管导热硅脂使得在真空变化过程中热导率测试结果比较平稳,但测试结果出现了较大的偏差,这是由于导热硅脂渗透到了试样中的开孔孔隙中,造成了试样热导率增大。

而且,从测试结果还可以看出,导热硅脂的渗透随着真空度的增大而增大,并最终达到稳定。由此可见,对于这种具有一定气孔率的材料,并不适合采用导热硅脂做为消除接触热阻的有效措施。

### 3.3. 硬质聚氨酯泡沫塑料填充导热硅胶片的试验验证

如图 15 和图 16 所示,将两片厚度为  $0.2\text{mm}$  的导热硅胶片分别放置在一对硬质聚氨酯泡沫塑料试样测试表面,常温常压下导热硅胶片的热导率为  $2\text{W/mK}$ 。将导热硅胶片和试样与探测器夹紧并放入真空腔内,分别进行常温和不同真空度下的热导率测试。

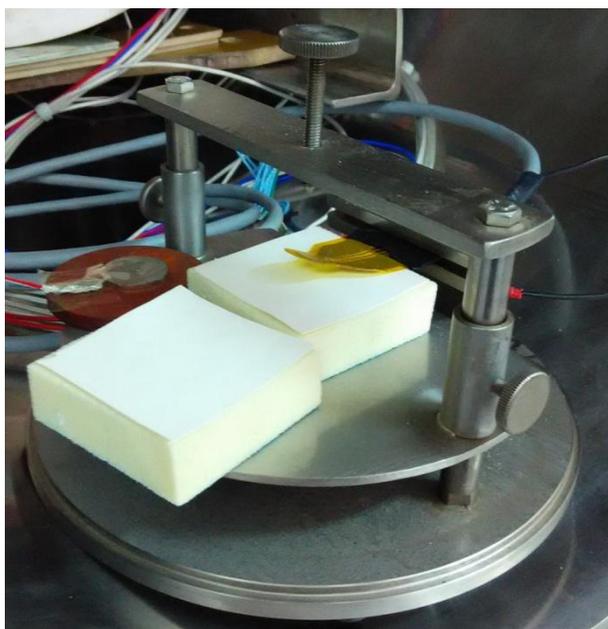


图 15 添加导热硅胶片的硬质聚氨酯泡沫塑料试样

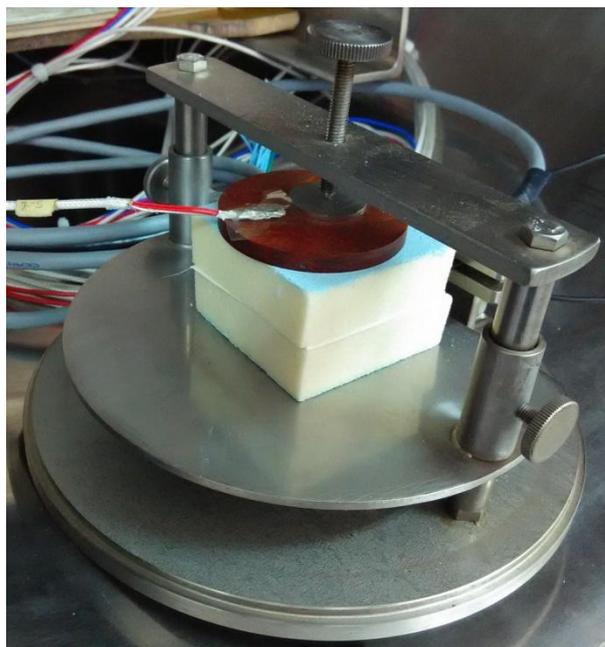


图 16 添加导热硅胶片后的硬质聚氨酯泡沫塑料试样测试状态

在增加导热硅胶片后,硬质聚氨酯泡沫塑料试样的热导率测试结果为  $0.36\text{W/mK}$ ,比采用导热硅脂后的热导率测试结果还要大,显然导热硅胶片自身的热导率给测量结果带来更大的影响,所以采用导热硅胶片的方法并不可行。

### 3.4. 硬质聚氨酯泡沫塑料填充面巾纸的试验验证

从以上采用导热硅胶和导热硅胶片的方法验证可以看出,由于这些添加物自身热导率要远大于试样本身的热导率,添加无尽管可以减小接触热阻,但同时使得整个热导率测试结果明显增大,严重干扰了试样自身热导率的准确测量。

由此可见,对于低导热材料的热导率测试,填充物既要有填充效果来消除试样与探测器之间空隙,填充物自身的热导率还不能太大,填充物热导率最好与被测试样热导率相当,而且还不随真空度变化而发生改变。

为此,我们采用了面巾纸进行试验,其目的时利用面巾纸的低导热和柔软性来降低接触热阻。如图 17 所示,将两片薄面巾纸分别放置在一对硬质聚氨酯泡沫塑料试样测试表面,并将面巾纸和试样与探测器夹紧并放入真空腔内,分别进行常温和不同真空度下的热导率测试。

图 18 所示为加面巾纸前后的硬质聚氨酯泡沫塑料热导率测试结果对比。

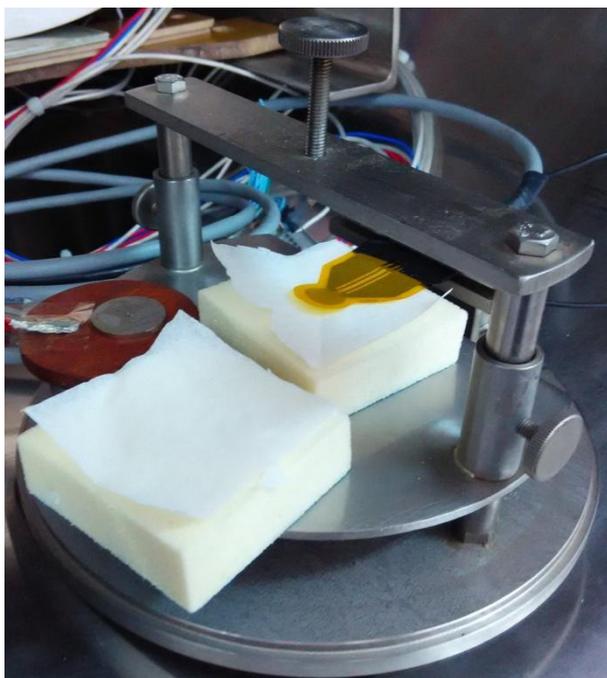


图 17 添加面巾纸后的硬质聚氨酯泡沫塑料试样

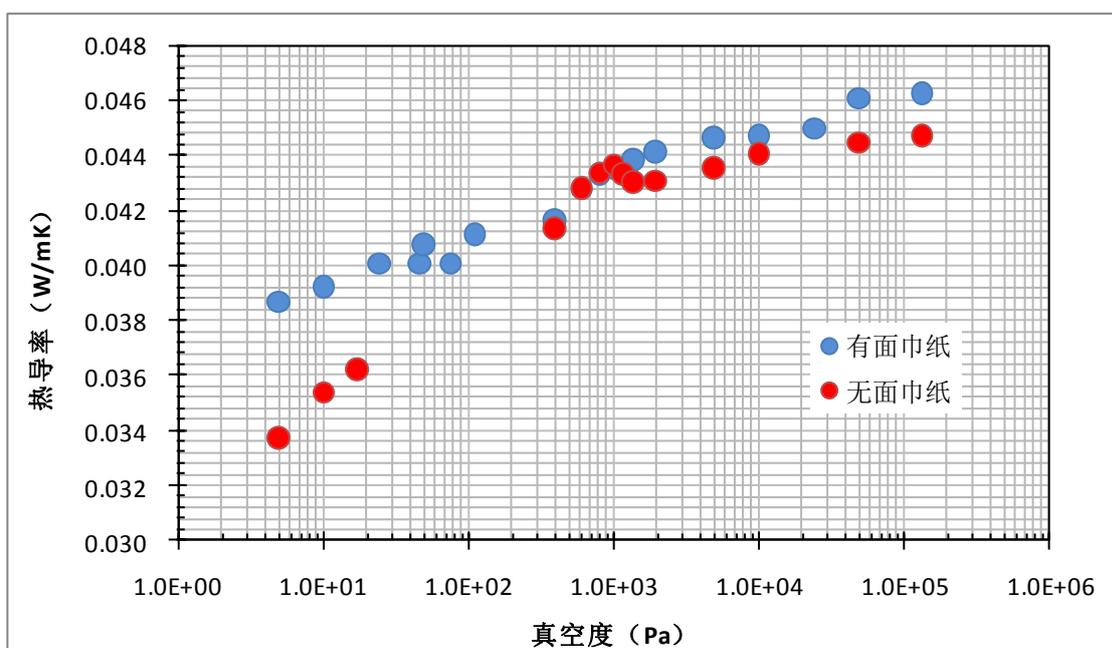


图 18 添加面巾纸前后硬质聚氨酯泡沫塑料热导率测试结果对比

从图 18 所示的测试结果可以看出，增加面巾纸后明显的减小了接触热阻随真空度变化的影响，但还是未能完全消除。同时，由于增加的面巾纸热导率比试样热导率略高，使得常压情况下增加面巾纸后的热导率测量结果增大了约 3% 左右。

#### 4. 结论

通过以上测试验证证明，在真空条件下解决接触热阻所带来的影响，可采取如下措施：

- (1) 对于高导热材料的测试，可采取常规的高导热热界面材料粘贴或涂覆在试样测试面。
- (2) 对于低导热或超低导热材料的测试，可以不采取任何措施直接进行测量。