

稳态热流计法导热系数测试技术应用——Application Note: 003

真空隔热板（VIP）及其墙体导热系数 和热阻测试方案设计



摘要：客户提出了一种新型墙体系统，这种系统结合了闭孔隔热泡沫材料包裹的真空隔热板（VIP），在具有较薄的外形尺寸同时，还具有很高的热阻。在提供额外热阻外，隔热泡沫还在施工过程中对真空隔热板提供防护，并为泡沫-VIP 结构单元提供合适的两面粘接表面。针对这种新型墙体系统和墙体设计过程中的优化和选型，设计了小尺寸 VIP 复合结构试样的热导率和热阻的测试评价方案，测试方案主要是采用了稳态热流计法热导率测试技术，设计了由 50 个热流计组成的热流测量矩阵以准确的获取热流密度分布情况。还设计了相应的热流计校准过程和测试步骤，并配合整个墙体的有限元分析设计了相应的数据提取方案。通过此设计方案所获得的结果可以更深入的了解 VIP 复合结构试样的内部热流分布情况，并可将这些结果应用到全尺寸墙壁的有限元分析中来预测整个墙体的热响应。

1. 项目背景

真空绝热板是导热系数较低的保温隔热材料。在保温隔热设施的应用上效能价值较好。真空绝热板的导热系数一般在 $0.005 W/mK$ 左右，生产工艺过程和原材料的选用控制的好，其导热系数能够达到 $0.004 W/mK$ 以下。VIP 主要应用于保温绝热、防火阻燃，如冰箱、深冷冰柜、医疗柜、车载工程冷库、矿难救生舱、建筑外墙、内墙保温等。

目前客户开发出了一种尺寸相对较薄的高热阻的墙体系统，此墙体系统是一种闭孔隔热泡沫包裹真空隔热板（VIP）结构，闭孔隔热泡沫除了提供一些额外的隔热功能外，还在施工中真空隔热板起到保护作用，同时也能为这种泡沫-VIP 结构单元提供合适的两面粘接表面。因此客户要求对这种复合多层结构墙体系统进行隔热性能测试评价，以期为这种墙体系统的优化、改进和生产提供更多信息。

对于墙体的热传输性能测试大多采用大型的保护热箱法和自然环境暴露试验装置，这些试验都属于大型试验并费用昂贵，也不应用在较小尺寸的泡沫-VIP 构件单元的测试。同时，热箱法这类大型稳态测试方法无法准确获得热流在被测试样中的分布情况，这点对于非均质类的 VIP 及其墙体系统的传热特性研究尤为重要。因此，在采用保护热箱法测试墙体前，首先需要对每一种备选墙体构件单元取出具有代表性的更小尺寸的试样件并采用小型装置进行大规模的测试。

本文所描述的测试方案，是基于客户的这种小尺度的 VIP 复合结构试样的热导率测量，由此方案测试所获得的测量结果可以深入的了解 VIP 复合结构试样的内部热流分布情况，并可将这些结果应用到全尺寸墙壁的有限元分析中来预测整个墙体的热响应。

2. 测量方法选择

对于客户的泡沫-VIP 构件单元小尺寸试样的热导率或热阻测试，一般都采用稳态护热板法和稳态热流计法。我们最终选择采用稳态热流计法进行测量，主要出于以下几点考虑：

(1) 护热板法测量的是试样中心量热区域大小范围内的等效热导率或等效热阻，护热板法比较适合均质材料制成的试样，而且测量精度高，常作为一级测试方法来校准其他方法。对于非均质材料，特别是由几个部件组成的泡沫-VIP 构件这种典型非均质材料来说，除了需要了解整体的热导率或热阻外，还希望更深入的了解热流在被测构件上的分布情况以及不同区域热流的相互关系和影响。这种需求则是普通护热板法测试设备无法满足的，但恰恰是热流计法热导率测试方法的优势。

(2) 热流计法热导率测量装置可以很方便的根据试样尺寸不同来进行相应的调整，适合的更宽泛的被测对象，而护热板法则由于制作工艺繁杂和技术要求高而无法满足不同试样尺寸的需要。另外，热流计法热导率测量装置与护热板法相比整体构造要简单，测试周期也相对较短，更适合大规模的测试。

(3) 热流计法是一种二级热导率测试方法，测量精度不如一级的护热板法。但通过校准，热流计法测试完全可以满足工程中的实际需要。最重要的是，对于 VIP 这种板材的中心热阻测量有相应的标准测试方法可以参考，如 ASTM C1667 用热流计测量真空保温层中心热阻率的试验方法 (Standard Test Method for Using Heat Flow Meter Apparatus to Measure the Center-of-Panel Thermal Resistivity of Vacuum Panels)

热流计测量装置是一种二级测量方法，常被用于测试评价均质材料的热导率，典型结构和使用方法在 GB/T 10295 和 ASTM C518 中给出了描述和规定。如图 2-1 所示，热板和冷板两块平板被精确的控制设定在温度点上，此时热流从热板穿过试样流到冷板，并在热流传感器上形成很小的温度差，热流传感器会输出一个与热流密度成比例的电信号。对于均质试样和均温的冷热板温度，热流是单向一维热流，这样就可以采用傅立叶传热定律来计算被测试样的热导率。

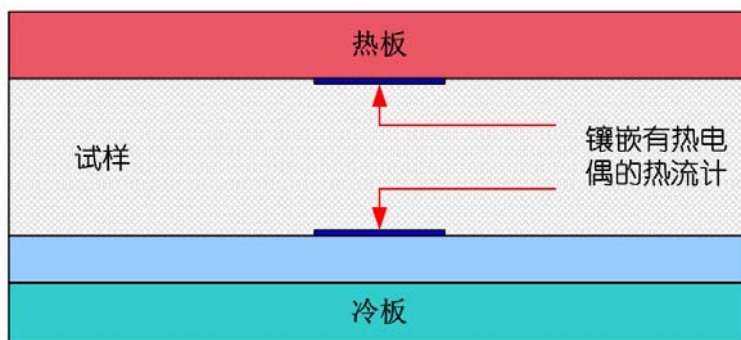


图 2-1 热流计法热导率测量装置剖面图

大多数热流计法热导率测试装置，包括 ASTM C1667 标准测试方法中，都在冷板上采用单只或有限几只热流传感器，为了准确测量和评价 VIP 真空隔热板和墙体单元这种非均质材料，满足客户对被测对象深入了解的要求，设计的热流计法热导率测试装置是在冷板和热板上布置热流探测方阵，这样可以测量热流密度分布。这种方阵布置形式如图 2-2 所示。在测试过程中采用了 50 个热流计来采集热流分布，其中冷板和热板各 25 个热流计，采用这种测量形式基本上可以实现各种结构形式的复合单元试件的测试，也可以根据不同的测试需要增加或减少热流计或进行其他形式的调整和改变。

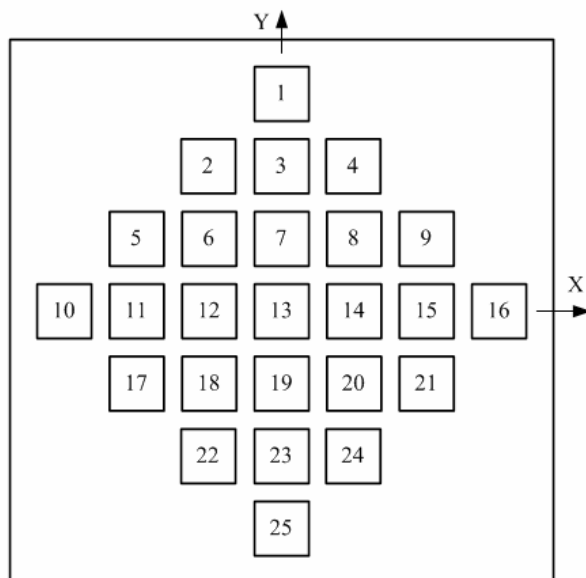


图 2-2 热流计分布编号图

对于热流计的校准，采用了 ASTM C1667 所描述的一种非标准校准方法来对非常小的热流密度进行更精确的测量，下面会对校准方法进行专门描述。

3. 被测试样设计

为了在建筑中利用真空隔热板，必须首先要保护它们在施工过程中避免刺破、划伤和磨损。一般的防护手段是采用闭孔型泡沫隔热材料包裹真空隔热板。在这种普通的结构框架内，相对于以下情形就会存在各种排列组合可能：如相邻真空隔热板相对于连接的缝隙如何布置、泡沫隔热材料的类型、分割真空隔热板时泡沫隔热材料的厚度以及使用其他可能的防护材料。

客户提供了十几种不同排列组合的墙体结构，要针对这十几种墙体结构要取出具有代表性单元作为被测试样。图 3-1 展示了如何取样使得被测试样能代表一个完整墙体中的交叉平板，并使得被测试样中真空隔热板之间的连接沿着中心热流计的中心线布置。所取的样品可以为包含了两块一定厚度的刚性泡沫隔热材料将真空隔热板夹在中间。这些部件之间的区别和变化可以表现在以下几个方面：

(1) 它们内部所包含的真空隔热板的数量和尺寸（一张完整大板，两张半块板或一张半块板加两块四分之一板）。

- (2) 刚性泡沫隔热层的类型和厚度。
 (3) 相邻于真空板边缘所用的材料。

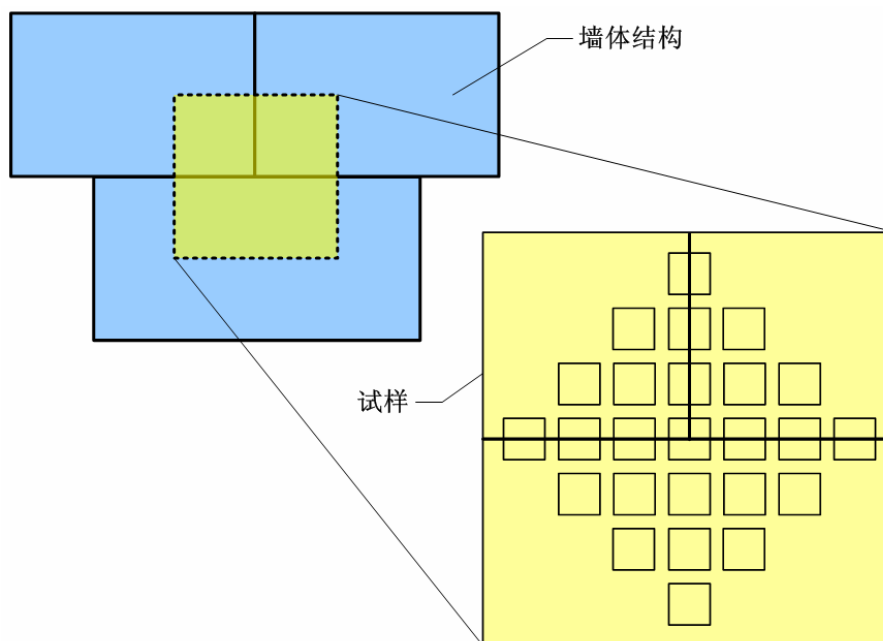


图 3-1 代表真空隔热板与一个整体墙体连接的被测试样

一个比较典型的墙体单元试样如图 3-2 所示。

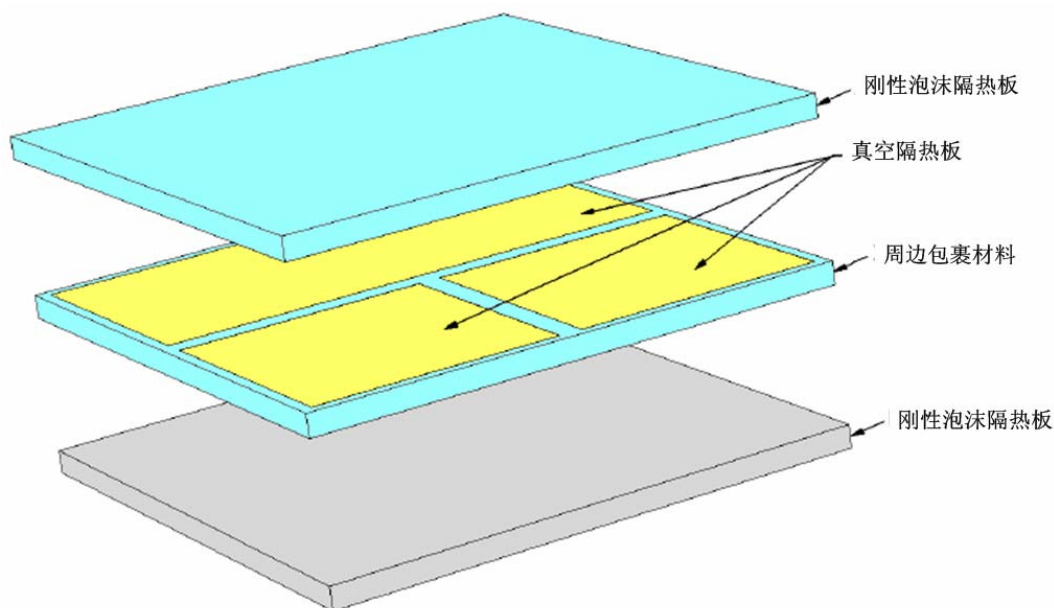


图 3-2 典型墙体单元试样结构示意图

除了上述的十几种墙体单元试样之外，还需要对至少两块正方形真空隔热板裸板进行热导率测试，每种刚性泡沫隔热板至少两块正方形试样进行热导率测试。

对各种被测试样进行设计过程中，要将各种真空隔热板之间的连接处设计在试样内，最好将连接处沿着与试样的两条中心线对中，

4. 热流传感器校准过程设计

热流计法热导率测量是一种二级测量方法，常用于对均质材料的热导率进行测量，如 GB/T 10295 和 ASTM C518 所描述的，二级测量方法需要依赖于标准参考材料来进行校准。

然而，各种真空隔热板是一些非均质试样，即使这些真空隔热板不被其他隔热材料包裹，在采用稳态热流计方法进行真空隔热板材料的热导率测量中仍然需要面对以下两个问题。

(1) 目前国内外的热导率标准参考材料的热导率约在 0.03 W/mK 左右，而真空隔热板的热导率则会低一个量级左右。因此，从真空隔热板中央位置穿过的热流要远小于穿过典型冷热面温差下的标准参考材料的热流，也就是说采用标准参考材料无法形成很小的热流模拟环境，由此需要进行特定的校准。

(2) 因为被测试样是非均质材料，各处的密度不同，在试样表面的热流密度会发展改变，所以就需要了解整个试样表面的热流密度分布。

4.1. 热流传感器的校准

在热流计法热导率测试这种二级测量方法中，一般是通过一个（或多个）已知热导率的标准参考材料来在线校准热流计，将热流传感器所输出的微伏信号转换成热流密度读数。标准参考材料的热导率已经通过一级测试方法事先已经得到了测量，这种一级测量技术通常是 ASTM C177 描述的保护热板法热导率测试仪器。

在热流计在线校准过程中，热流计法热导率测试仪器中的热板和冷板被控制在不同的恒定温度上，由此温度差产生一个热流，可以通过冷热板温度、标准参考材料热导率和傅立叶热传导公式获知此热流的大小。具体的试验过程在 ASTM C518 中进行了详细描述，热流计的校准方法和校准计算公式在 ASTM C1667 中也有详细描述，其中计算公式中的各个测量结果定义了热流计灵敏度是一个冷热板温度的函数。由此可知，热流计的校准受限于测试中冷热板的温度范围和产生热流的范围。根据 ASTM C1667 公式(4.1.1)~(4.1.3)展示了典型描述和热流计灵敏度的使用。

$$S = f(T_{plate}) = \frac{\lambda_{Reference\ standard} \times \Delta T}{E \times L_{Reference\ standard}} \quad (4.1.1)$$

$$q_{Specimen} = E \times S(T) \quad (4.1.2)$$

$$\lambda_{Specimen} = q_{Specimen} \times \frac{L}{\Delta T} \quad (4.1.3)$$

式中： S 表示热流计灵敏度，单位 $(\text{W/m}^2)/\mu\text{V}$ ； T_{plate} 表示热面或冷面温度，单位 K ； $q_{Specimen}$ 表示流经试样的热流密度，单位 W/m^2 ； E 表示热流计输出电压，单位 μV ； λ 表示热导率，是试样平均温度和密度的函数，单位 W/mK ； L 表示试样厚度，单位 m ； ΔT 表示冷热板之间的温度差，单位 K 。

按照 ASTM C1667 的规定，对于标准情况下的应用，热导率测量的合成不确定度约为 $\pm 2\%$ ，95%的置信级。合成不确定度中的最大分量是热流计灵敏度的不确定度，它很大程度上是由标准参考材料的不确定度决定，这个不确定度在 1~2%量级。

对于真空隔热板热导率测量中微小热流密度，测量这种微小热流密度的热流计校准就是缺乏像真空隔热板热导率那样低的任何标准参考材料。如 ASTM C1667 所描述的，可以采用两种途径来进行校准：

- 真空隔热板热导率很小也就是其热阻很大，相对于这样大热阻的真空隔热板来说，标准参考材料的热阻则小很多。因为热阻可以通过串联的方式进行增大，所以采用多个标准参考材料进行多层叠加，即将已知标准参考材料的已知热阻进行串联来达到真空隔热板热阻水平，以便把热流大小降低到与真空隔热板内热流大小附近。这种校准方法显然增大试样的厚度而会改变了冷热板之间的距离，由此可能会增加边缘影响的不确定度。
- 还是采用常规的单个单层标准参考材料，但需要减少冷热板之间的温度差，由此来降低热流大小，但这会增加相应的温度差测量的不确定度。

在采用热流计法热导率测试方法来评价 VIP 墙体单元试样的热性能过程中，很多工作应该聚焦在评价热流计的灵敏度上。为进行热流计的校准，可以分别将 1 层、2 层、3 层和 4 层的标准参考材料（美国 NIST 1450b）放置在测量装置中。NIST 1450b 是一种高密度玻璃纤维标准试样，已经被鉴定过的热导率是密度和平均温度的函数，这些标准试样在校准前需要进行仔细的保存和充分干燥。将以上 4 种试样的测试结果按照已知的热流密度根据公式(4.1.2)进行线性回归，得到试样冷热面上 50 只热流计的灵敏度值，这些灵敏度值被定义为“初始校准”的热流计灵敏度值。

当将热流计灵敏度原始数据应用到测量数据中时，可能会发现测试结果一致性并不一定好，可能会看到从试样流到冷板的净热流要大于热板流到试样的净热流，冷板上每个位置的热流计所测得的热流密度值

都可能要大于位于热板处的热流密度值。如果改变热流方向，即底部为热板顶部为冷板，这种情况依然可能出现。在稳态护热板法热导率测试设备中边缘进行了很好的隔热处理，而在热流计法热导率测量装置中一般都不采取特殊的隔热措施，如果试样的平均温度要略高于环境温度，这就造成环境热流从边缘位置进入到了试样而出现不对称和不平衡现象。通过增加一定的边缘隔热措施，会这种边缘效应。

在热流计校准中还需要做的一个校准是热流计零偏差校准，即将不同厚度的标准参考材料放置到测试设备中，并控制冷热板的温度相同（温差小于 0.01°C ）以产生一个零热流条件，这时的热流密度测试结果相差很小，平均热流密度基本为零。但对于较厚试样（热阻类似于大多数 VIP 板的测试试样热阻），在冷板处可能会产生一个过高的流出试样的热流，同时在热板处产生一个过低的进入试样的热流，这样，在中央区域 13 号位置，会产生出一个热流密度净偏差，这个热流密度净差值就是测量过程中误差值。

为了补偿这种零偏差，可以采用线性补偿的方法，其中就包括一个常数偏差项。在零热流条件下对 4 层标准参考材料 NIST 1450b 试样进行测试所得的零偏差结果加入前述 4 层 NIST 1450b 热流计校准结果中，并按照公式(4.1.4)的形式进行回归分析：

$$q_{\text{specimen}} = S_1 \times E + S_2 \quad (4.1.4)$$

由此，对每一个热流计进行这种形式校准可以得到两个灵敏度系数 S_1 和 S_2 ，而在零热流条件下的校准则定义为“最终校准”。需要特别注意的是这个校准只在特定的冷热板温度条件下是有效的，这是因为 S_1 和 S_2 两个系数会随着冷热板温度的变化而发生改变。另外，正如对所有热流计校准一样，这个校准形式只可能应用在校准热流密度范围内的热流密度测量。

4.2. 热流测量的不确定度评估

按照 ASTM C1667 中的不确定度评价方法来根据各个不确定度分量来评估出热流计热流密度测量的合成不确定度。按照热流计测量热流密度的函数关系和测量过程，热流密度灵敏度的标准偏差可以应用公式(4.2.1)这种简单形式：

$$\frac{\delta S}{S} = \sqrt{\left(\frac{\delta \lambda_{\text{cal}}}{\lambda_{\text{cal}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T_{\text{cal}}}{\Delta T_{\text{cal}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta L_{\text{cal}}}{L_{\text{cal}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta E_{\text{cal}}}{E_{\text{cal}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{reg}}}{q_{\text{cal}}}\right)^2} \quad (4.2.1)$$

式中： $\delta S/S$ 表示热流计灵敏度的标准偏差，单位%； $\delta \lambda/\lambda$ 表示标准参考材料的热导率标准偏差，单位%； $\delta \Delta T/\Delta T$ 表示冷热板温差的标准偏差，单位%； $\delta L/L$ 试样厚度的标准偏差，单位%； $\delta E/E$ 表示热流计输出电压的标准偏差，单位%； $\sigma_{\text{reg}}/\bar{q}_{\text{cal}}$ 表示回归分析的标准偏差，单位%。

校准热流计灵敏度时的合成不确定度，如(4.2.1)公式所示，包含的不确定因数有标准参考材料试样热导率、温度测量、厚度测量、热流计电压输出和数据回归分析。对自身的回归分析一般会显示出很小的偏差，一般热流计灵敏度校准的不确定度约为 1~2%，对不确定度贡献最大的是校准时所用标准参考材料试样的热导率不确定度分量。如果在实际校准中使用的标准参考材料试样已经具有一个 2% 的标准偏差，由此所产生的 2% 的标准不确定度。

热流密度测量的合成不确定度，如公式(4.2.2)所示，就包含了校准热流计灵敏度的不确定度（假时 2%）和热流计电压输出不确定度（对于采用 VIP 试样中的热流密度测量，假设电压输出约 10~15 微伏，则可以假设不确定度约 1~4%）。由此合成不确定度变化范围为对于 $6\sim 7\text{W}/\text{m}^2$ 的热流密度测量时约为 2.5%，对于 $2\text{W}/\text{m}^2$ 的热流密度测量时约为 4.7%。

$$u_c = \sqrt{\sum u_n^2} = \sqrt{\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{E}\right)^2} \quad (4.2.2)$$

式中： u_c 为合成不确定度，单位%； u_n 为一项不确定贡献因子，单位%。

4.3. 单次校准试验时间

对于具有很低热导率的被测试样，已经经过业内广泛的证明稳态法的测试时间很长。对于热流计低热流密度条件下的校准时，校准试验时间至少需要 7 个小时。如果从冷热面温度和热流密度的测量值判断很快的达到的稳态条件，这说明测试过程中出现了问题，要及时查清原因，或从新安装试样进行校准测量。

4.4. 重复性测量方案设计

重复性测量可以认为是校准过程的一部分来评定整个测试设备的性能指标，在重复性测量过程中将会使用到两种形式的墙体单元作为被测试样：

第一个是一张 VIP 板的墙体单元，即此种墙体单元的结构是两张泡沫隔热板加持一张相同尺寸的 VIP 板，四周用隔热材料包裹。此测试试样被用来作为重复性检验是十分有用的，这是出于以下原因：

- 具有单张大 VIP 板的单个被测试样，具有热流密度分布均匀的特点。
- VIP 板可与冷热板对齐。
- 具有非常低的热流密度值，可用于校准检查。

第二个是图 3-2 所示的墙体单元结构，这是一个三片结构被测试样，此测试试样被用来作为重复性检验十分有效，主要因为以下原因：

- 热桥具有很大的热流。
- 对齐后的多片结构试样被整体一起放入试验装置中。
- 在不同的热流计安放位置处，热桥具有很大的变化性。

4.4.1. 单张大 VIP 板被测试样的重复性测量设计

对这种单张大 VIP 板被测试样进行多次重复测量测试，每个热流计的热流密度测量结果取平均值和计算最大偏差百分比，测试结果肯定会表现出在热流计矩阵区域中心（13 号热流计位置）的热流密度最小，在矩阵区域热流密度分布也相对平坦，而越是接近边缘热流密度越是会逐渐增大。在整个被测部件的中心区域内（或延伸到热流计覆盖的区域）热流密度希望是足够的均匀，这个中心区域是指包括了除了 1、10、16 和 25 号热流计外的所有热流计区域。

另外，希望所测试的热流密度分布呈现中心点对称的形式，但测试结果很可能出现 1 号和 25 号热流计以及 10 号和 16 号热流计测量结果明显的非对称，更严重的情况是出现更大范围的不对称。

由此，对这种单张大 VIP 板被测试样旋转 180° 后进行附加重复性测试，在这个附加测试中，除了中心位置的 13 号热流计外，各个热流计会覆盖到其他被测试样位置上。

比较被测试样旋转 180° 前后 2 次重复性测量得到的热流密度测量值，应该可以看出是试样本身的不均匀造成了热流分布的非对称性或者是试样尺寸未完全对其冷热板边缘造成的非对称性。

然后，分别将“初始校准”和“最终校准”应用到热流密度测量结果中，再一次观察热流密度分布情况，各个热流计的热流密度测量之间的变化应该非常小，如果在热流计中有一个较大的改变都将会凸显在相同热流密度测量中。

4.4.2. 三片结构被测试样的重复性测量设计

这种更复杂的被测试样包括了多块 VIP 板，这些试样并不是一个简单结构，而是两块或三块分割板必须在放入到热导率测试仪器前合理的对齐组成被测构件试样。任何未对齐或在板与板之间无意识留下缝隙都会影响热流密度的测量。因此对这种结构的被测试样依然进行重复性测量。

在这种试样的重复性测量中，绝大多数热流计应该表现出很好的一致性。个别热流计所表现出来的非一致性，一种可能原因是被测试样在热导率测量装置中的放置问题，即试样尺寸小于冷热板尺寸，这就造成放置被测试样到测量装置中时留下了余地，而放置一个被测试样的标准程序是要求被测试样要与测量装置的冷热板齐平。

为了评价这些可能试样位置变化多带来的影响，可以进行两个附加试验测试：一个是将被测试样与测量装置冷热板的后面和左面边缘对齐，另一个是将被测试样与测量装置冷热板的后面和右面边缘对齐，由此来了解位置改变对整个热流密度测量结果的影响大小。

对于三片 VIP 板之间的中心定位热桥的情况，重复性测量结果中将会存在一个非常大的热流密度变化范围，而且热流分布会呈非对称性，这就可能需要进行进一步的比较试验。进一步的测试试验是将被测试样旋转 180°，除了试样的中心位置（13 号热流计位置），旋转前后在每个方向上不同热流计所对应的试样位置都发生了改变，如图 4-1 所示。为有助于解释热流密度，部件中每块 VIP 真空隔热板的位置在图示中用轮廓线标出，白色的空白区域代表 VIP 真空隔热板周围的材料。理想情况下，试样旋转前后冷热板上同方向上的热流计测量结果应该都相同。

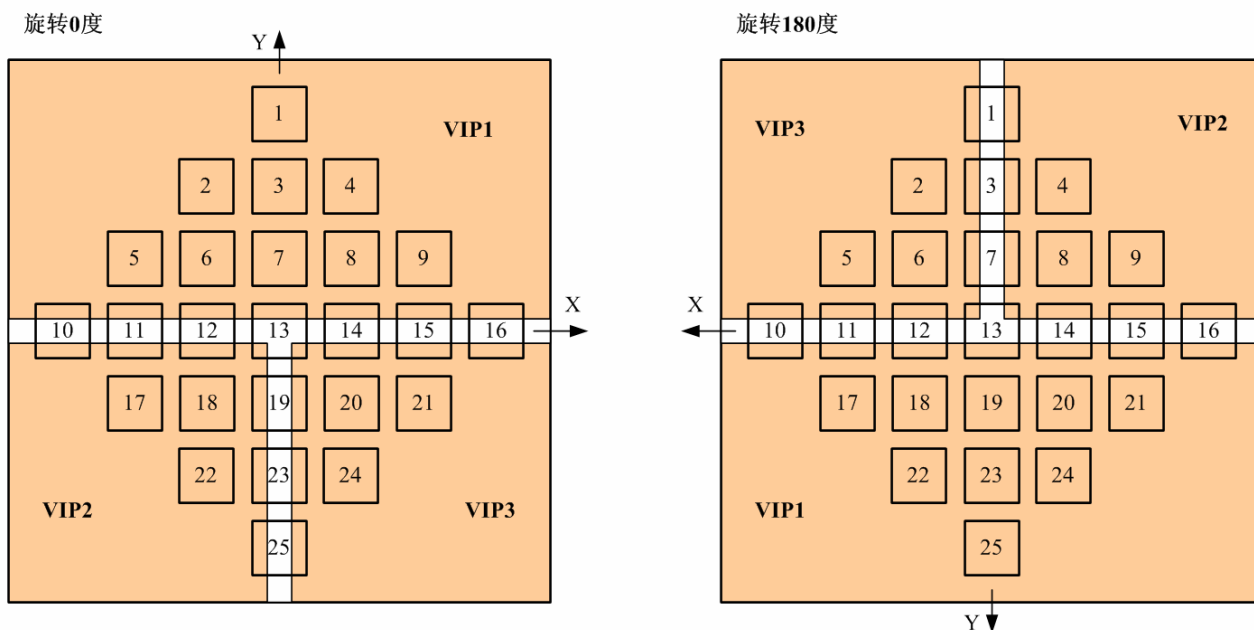


图 4-1 测试中交替改变方向后的 VIP 组件试样

5. 测试试验步骤设计

每一个墙体单元被测试样都包含了单一材质或两种材质刚性泡沫隔热板，由于这些泡沫隔热板材料的热导率会影响到墙体单元的性能，因此需要进行一系列的热导率测量以确定这两种材质刚性泡沫隔热板热导率随温度的变化曲线。

然后对客户提出的各种典型结构形式的墙体单元进行测试，只测试一组冷热板温度下的热流密度分布和热导率，以期了解不同结构形式的墙体单元的传热性能，为墙体单元的结构优化作为参考依据。

有一种特殊情况可能会是上下两块硬质泡沫隔热板的厚度选取的不同，在更厚的泡沫板外表面上会产生一个更加均匀的温度场分布，这对消除由于密度不均匀而造成热流分布不均匀现象有一定的效果。

6. 测试结果分析方法方案设计

对所有墙体单元的热流密度测试结果进行列表现实，计算出被测试样上不同位置处的热导率并得到相应的有效热阻值，其中所列出的热流密度值应是冷热板上热流传感器测量值的平均值。针对被测试样不同位置处的有效热阻值，选择两个极端结果进行比较，一个是最低热流密度测量结果，另一个是最高热流密度测试结果，从这两个极端测量结果中可以看出有效热阻值的偏差。通过这些墙体单元热流密度分布的测试，可以验证墙体单元的设计合理性。

根据客户的要求，在墙体单元的设计过程中需要用到数学模型来进行有限元分析计算。有限元分析是一种探索被分析对象还未经试验验证的设计方式，对于墙体采用数学模型进行设计只能在各个单项材料热性能已知的情况下有效，即只能在 VIP 真空隔热板热性能已知的情况下有效。数字模型分析中所需的关键 VIP 性能有：

- (1) 有效热导率，这会影响多少热量在 VIP 中传递；
- (2) 热障材料厚度与热导率的乘积：这个乘积会影响多少热量在 VIP 边缘的传递。

为了了解 VIP 真空隔热板热性，就需要从热流计测试试验中所获得的数据进行提取，此提取方案如下：

对单张大的 VIP 墙体单元进行测试的目的是为了得到中央平板有效热导率，在上述测试试验中已经得到了这个数据，测试获得的流经整个部件的热流和温度差可以被用来获得此墙体单元平板试样中央的有效热阻值。由于刚性泡沫层随厚度和温度变化的热导率已知，它们对于整个有效热阻值的贡献可以被剔除掉，这样就可以得到纯 VIP 平板中央的热阻值以及相应的 VIP 的有效热导率。

具体方法是先采用 13 号热流计测得的平板中心位置热流密度来计算热导率，热导率的计算通过以下

三种方式：

- 采用顶部处的热流密度测量结果；
- 采用底部处的热流密度测量结果；
- 采用顶部和底部两处热流密度测量结果的平均值。

由此，通过这个中心位置的热流计，从顶部和底部热流测量结果分别计算出 VIP 板中心处的热导率。在所有的重复性测试中，这两个热导率之差应很小。

然后采用位于中心区域的 9 只热流计测量结果取平均值，那么顶部和底部热流计数据所对应的热导率计算结果之间相差会变大。尽管如此，这个偏差也应该是在测试仪器热流密度测量不确定范围内。中心区域 9 只热流计的平均测量结果可能比单只中央热流计测量结果更能标识出真实的热流情况，因此，从这些测试中得到的热导率作为最好评估值。

采用同一台热流计法热导率测试设备对两块 VIP 裸板进行测量，这些 VIP 裸板可以不是墙体单元构件中的一个部件，但这些裸板最好是同厂家同批次的产品，VIP 裸板也可以是从墙体单元试样中拆卸下来的 VIP 板。对墙体单元中的 VIP 板进行单独测量以期发现是否有能给 VIP 热导率计算带来失真的影响因素。从单独 VIP 测量结果所得到的热导率与从构件测量得到的结果相比相差应当很小才合理。

在墙体模型建立过程中，大的数学模型是包括一个或多个 VIP 和刚性泡沫隔热材料夹心结构，但为了更准确的进行模拟分析，模型中尽可能包括更多真实的内容，如因为边缘密封和包裹而在一些 VIP 板的某些部位上出现的多层热障材料。事先并不知道这些详细内容是否会对整个构件的性能产生影响，但它们会明显的影响布置在边缘的热流计的读数。因此，在模型中包括这些内容用来从热流计读数中提取性能数据则非常重要。但不幸的是仍有其它 VIP 构件的其它特性并不能包括在数字模型中，如被测试样中用于粘接 VIP 和泡沫隔热材料的硅胶的数量、分布和性能则是未知的。VIP 板构件之间和未对齐所带来的缝隙，这些缝隙的尺寸和位置则也是未知的。

数学模型的模拟计算结果将会通过与 50 个热流计对应位置上的热流密度计算值显现出来，通过数学模型与优化过程进行耦合从设计角度来改变 VIP 性能（如核心热导率、热障材料的热导率与厚度乘积）以便找出能给出测量和计算之间获得最佳匹配的组合。

组合的最佳匹配定义是下式的最小化：

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n W_i (q_{i-meas} - q_{i-calc})^2}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6.1.1)$$

式中： W_i 表示权重因子。权重因子的分配基于所有面积的近似比值，所有面积是指被热流计所覆盖的面积。

由于四个热流计最靠近构件的边缘（1、10、16 和 25 号），周边效应（即边缘并不是完美的绝热边界条件）就会对这四个热流计产生影响。所进行的优化采用两种方法：一种是采用所有热流计进行优化，另一种是去掉边缘热流计进行优化。可以通过设置它们的权重因子为 0 来去掉 1、10、16 和 25 号热流计。

7. 总结

测试方案的被测对象是一种特殊墙体系统，这种墙体系统混合了被闭孔隔热泡沫包裹的多块真空隔热板（VIP），除了增加一些热阻之外，隔热泡沫还起到构建和施工过程中对真空板的防护作用以及提供一个相应的粘接面来与相邻两个泡沫-VIP 单元进行粘接接合。

测试方案中的被测试样是墙体系统分段采样形式，被测试样即要符合热流计法热导率测量装置对试样尺寸的要求，还需要对墙体系统的性能具有代表性。设计了复合 VIP-泡沫隔热结构中多种配置形式的测试评价方案，在所设计的测试方案中，被测试样内的所有部件粘接点都位于热流传感器矩阵中，而热流传感器矩阵则位于测量装置的顶板和底板上。

设计了特别的校准步骤以保证在对这些非常低的热导热试样测量过程中的精度。设计了测试步骤以及配合数学模型模拟分析的性能参数的提取步骤，可使得数学模型分析应用到研究真空隔热板的尺寸、包裹真空板所有的泡沫材料类型以及真空板之间泡沫截面的厚度和形状所带来的影响，研究各种可能的粘接效应等，以期预测出整个系统的热性能。

这个在大平板上一个区域中采用矩阵分布热流计来描绘整个区域热流分布的设计方案显示出明显的优势和前途，可以用于量化结构布置特征的大型结构件的预期性能。

8. 参考文献

[1] ASTM C1667, Standard Test Method for Using Heat Flow Meter Apparatus to Measure the Center-of-Panel Thermal Resistivity of Vacuum Panels, ASTM International, 2009.

[2] ASTM C518, Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, ASTM International, 2010.

[3] ASTM C177, Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus, ASTM International, 2010.

鸣谢

在此感谢美国橡树岭国家实验室在技术上的交流和支持。