

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.01.005

## 真空绝热板负压膨胀与吸盘响应关系

郑青<sup>1,2</sup> 陈照峰<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学绝热与节能材料国际实验室, 南京, 211106;

2. 南京凤源新材料科技有限公司, 南京, 211113)

**摘要:**对于市场前景广阔的气相二氧化硅和玻璃纤维芯材的真空绝热板(Vacuum insulation panel, VIP), 可以通过检测其内压值来检测 VIP 质量。本文以负压膨胀法(即逆真空法)原理研发了内压测试仪, 可以快速有效地测试 VIP 板内压强值, 以此判别该 VIP 板是否合格。对测试结果与理论值进行对比发现, 该测试仪精确度较高, 误差可以控制在 1% 左右。然后, 研究了不同口径大小吸盘对玻璃纤维芯材 VIP 内压测试结果的影响, 试验证明仅小口径吸盘才能成功地测试该类 VIP 板内压值。最后, 采用 MATLAB 线性拟合模块研究了两种 VIP 板内部压强与导热系数的关系式, 可以从理论上更好地指导 VIP 板的高质量生产。

**关键词:**真空绝热板; 内部压强值; 导热系数; 吸盘; 线性拟合

**中图分类号:** TB77      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2017)01-0034-06

## Relationship of Negative Pressure Expansion and Sucker Response of Vacuum Insulation Panel

ZHENG Qing<sup>1,2</sup>, CHEN Zhaofeng<sup>1</sup>

(1. International Laboratory for Insulation and Energy Efficiency Materials,  
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China;

2. Nanjing Phoenix Source New Material Technology Ltd, Nanjing, 211113, China)

**Abstract:** In view of the vacuum insulation panel (VIP) with silica or glass fiber, we can measure the inner pressure to judge its quality. Based on the negative pressure expansion method (i. e., inverse vacuum method), this paper develops an instrument to measure VIP's inner pressure quickly and efficiently, so as to identify whether the VIP is qualified or not. Compared the measuring results with the theoretical value, it is proved that the accuracy of instrument is high and its error can be controlled within 1%. Then, for the VIP with glass fiber, the effect of different diameter sizes of suckers on inner pressure measuring is studied, and test result shows that only the sucker with small diameter size can measure the inner pressure. Finally, using the MATLAB linear fitting module, the function relationship of inner pressure and thermal conductivity of two kinds of VIP is discussed, which can guide the high-quality producing of VIP theoretically.

**Key words:** vacuum insulation panel; inner pressure; thermal conductivity; sucker; linear fitting

**基金项目:**江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目;南京市江宁区科技型中小企业技术创新专项基金资助项目。

**收稿日期:**2016-11-28; **修订日期:**2016-12-20

**通信作者:**陈照峰,男,教授,博士生导师, E-mail: zhaofeng\_chen@163.com。

**引用格式:**郑青,陈照峰. 真空绝热板负压膨胀与吸盘响应关系[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 34-39.  
ZHENG Qing, CHEN Zhaofeng. Relationship of negative pressure expansion and sucker response of vacuum insulation panel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 34-39.

目前真空绝热板(Vacuum insulation panel, VIP)板内部压强测试的方法有很多种,综合来看大致可以分为感应器内置或者感应器外置这两大类别。VIP 膜材由各类高阻隔膜(PA、VMPET、Al、PE)封压而成,在合理使用的时间期限内会存在一定的气体和水蒸气透过率,因此这些测试方法对新 VIP 板产品的高品质发展有实质性的价值<sup>[1]</sup>。在国外主要有以下几种方法:磁悬浮转子归法、远距离感应法、热检测法(va-Q-check)、基于热红外技术法以及永久气压传感器法等<sup>[2]</sup>。国内也研究过关于检测 VIP 板内压强的测试方法,例如提升膜材的负压膨胀法等。

本文采用负压膨胀法研发了新型 VIP 板内压测试仪,该测试仪在裸露原型机的基础上进行改造,更换了几个最主要的性能组件,装配进一步得到优化,测试效率也进一步得到提升。同时研究了不同口径大小吸盘对玻璃纤维芯材 VIP 内压测试结果的影响,并采用 MATLAB 推导了两种 VIP 板内部压强与导热系数的关系式。本文研究可以从理论上更好地指导 VIP 板的高质量生产。

## 1 新型 VIP 板内压测试仪

### 1.1 测试仪工作原理

图 1 为新型 VIP 板内压测试仪的造型设计图(图 1(a))和实物图(图 1(b)),该测试仪先后经历了外观造型设计、大小件机械图纸设计、零件加工制造、单片机电气化系统设计(程序导入控制)、装配以及数据调试处理等几个步骤。成型改造后的测试仪整体长 35 cm,宽 45 cm,高 50 cm,适合放在 90~120 cm 的桌面上进行实验操作。

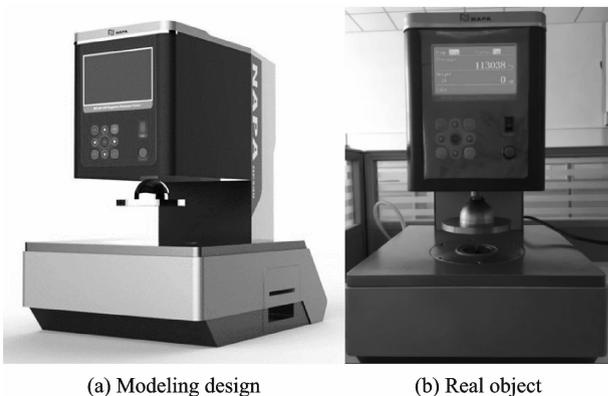


图 1 内压测试仪

Fig. 1 Inner pressure measuring instrument

新型内压测试仪是利用 VIP 板在负压状态下膜材发生膨胀位移的方法,即逆真空法,来测定板材内部的压强<sup>[3]</sup>。测试仪上下金属吸盘面的真空密封圈压紧住 VIP 板,真空泵运作抽气负压,上下吸盘系统腔室内气压从标准大气压值开始下降,直

到降至 VIP 测试板的内部真空度附近(这是个突变点值),继续下降时 VIP 测试板的膜材就会因为压强差而膨胀发生位移,激光测距仪可以及时、灵敏地捕捉到负压膨胀的突变点,相应时刻的系统压强值就等效于 VIP 测试板的内压值,工作原理示意如图 2 所示。抽气过程中当吸盘内压强  $P > P_{\text{内}}$ ,VIP 板膜材保持原形;一旦  $P \leq P_{\text{内}}$ ,VIP 膜材就会发生突然膨胀。

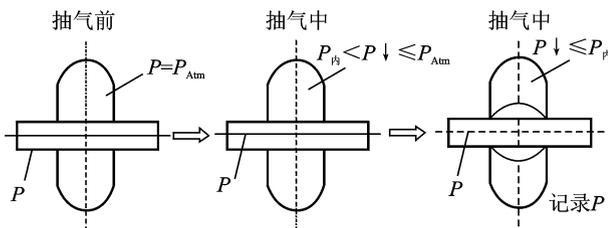


图 2 内压测试仪工作原理示意图

Fig. 2 Working principle of inner pressure measuring instrument

### 1.2 测试组件及用途

新型内压测试仪主要由外壳造型系统、内压测量系统、内置打印机系统和操作面板系统等组成,上吸盘连带着自动化式升降机械杠杆,下吸盘安装着激光测距仪、电阻真空计等主要测试组件<sup>[4]</sup>。图 3 分别为激光测距仪、真空计、内置式打印机、真空泵的实物图。

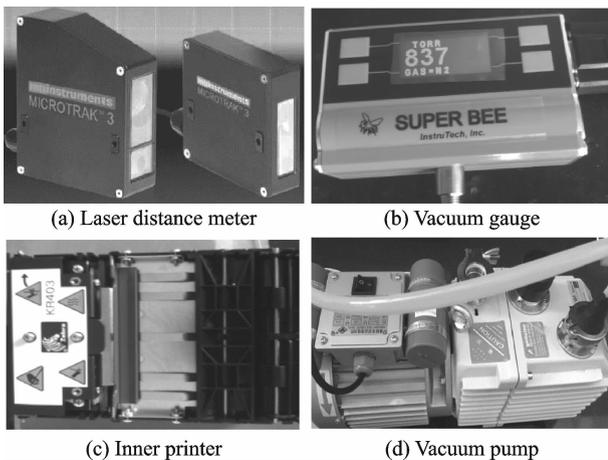


图 3 四大重要组件实物图

Fig. 3 Four important parts of instrument

新型内压测试仪在 VIP 板负压状态下,采用三角法原理的激光测距仪捕捉膜材受力膨胀凸起瞬间。测试过程中,仪器上下金属吸盘压紧了 VIP 测试板,激光测距仪探测点到膜材距离在量程范围内,抽气负压直至膜材发生膨胀,测距仪显示的位移有突变,则单片机系统会发送命令至其他组件,并停止工作,最后将测距仪显示的位移数据显示在面板屏幕上。

CVM201 真空计实时记录吸盘腔室内的真空度,且真空计与单片机主板串口连接,VIP 板测试

时抽气吸盘腔室内压强下降,每一瞬间的压强值均会在面板屏幕显示,当达到板内真实真空度(即临界压强)时,膜材发生突然膨胀位移,测距仪探测到此突变点,单片机系统停止其他组件工作,最终的压强值会显示在面板屏幕。

### 1.3 测试工作流程

新型内压测试仪对 VIP 板测试具体流程如下:(1)打开内压测试仪电源,设置具体参数;(2)放置 VIP 板测试板,测距仪初始值显示在量程内;(3)按绿色启动按钮,上吸盘系统下降紧压,真空泵工作负压测试;(4)压强下降直至测距仪位移发生突变(即膜材突然膨胀凸起),出现临界压强值;若不出现,继续工作抽气负压至设定值;(5)真空泵停止运作,SMC 电磁阀放气,上吸盘系统 3S 提升;(6)自动打印测试标签,测试完毕,进入下一个循环。

## 2 VIP 板负压膨胀与吸盘的响应

新型测试仪上下金属吸盘直径均为 5 cm,抽气负压过程中不同 VIP 板所显示的压强、位移随时间的曲线试验也不同。当抽气负压至 VIP 板内真实值时,膜材会膨胀突起,测距仪测得位移就会发生突变,在测试图像中会以转折点显示。

在气相二氧化硅(简称气硅)为芯材的 VIP 板测试中,采用 5 cm 吸盘口径可捕捉膜材负压突然膨胀鼓起的瞬间,在图像中可明显观察到曲线的转折。然而在玻璃纤维为芯材的短切丝 VIP 板测试中,采用 5 cm 口径吸盘却找不到测试曲线的转折点,因而采用内径为 8,10,12,14,16,18 cm 的吸盘及内径为 1 cm 极小吸盘继续测试,寻找图像中曲线是否可以出现转折点。

### 2.1 气硅 VIP 板

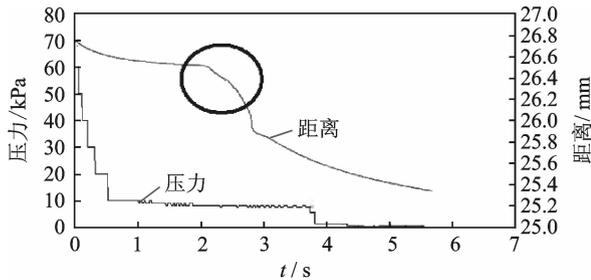
当 VIP 板放置在下吸盘上时,测距仪显示有初始位移距离值,随后启动测试仪,上吸盘系统下降紧压 VIP 测试板,同时上下吸盘的密封圈均会发生压缩形变,下吸盘密封圈的压缩变形量在图像中也会显示为曲线刚开始的平稳波动;继续抽气负压,VIP 板膜材在接近自身内压值时就会突发膨胀,膜材的变形在图像中表现为曲线的斜率瞬间变大,形成一个大致凸起峰。

气硅类芯材的 VIP 板整体的压力-位移测试曲线如图 4 所示,样品 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 多次重复试验中,膜材因压强差而膨胀变形瞬间均能在曲线中显示(图 4 中黑色圈标记为形成的凸起峰)。中间点位置(峰值处)对应的压强值 4.5 kPa 即是测试所得的 VIP 内压值。

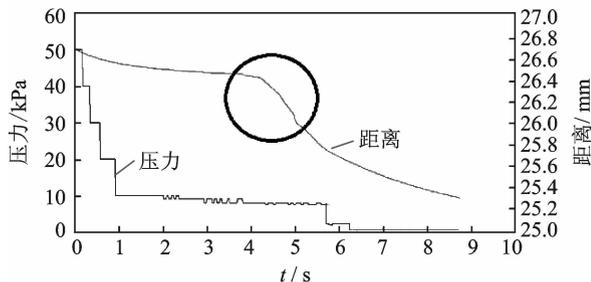
在制作 VIP 板过程中,可以控制内部压强值,用 SuperBee 真空计延伸探测至 VIP 板内部后再

抽气封边。此方法仅适用于试验样品的制作,不适合量产化。另外在 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 气硅芯材 VIP 板样品制作过程中,SuperBee 真空计上显示为 33.0 Torr,即为目标压强 4 389 Pa,这与实际测试的 4 500 Pa 接近。

按此方法多次试验气硅类 VIP 板,均可以找到类似的凸起峰,得出的测试结果值与精确目标值接近,证明此内压测试仪可用于气硅类芯材(即硬质芯材)VIP 板的内部压强测试。



(a) Test curves of sample 1<sup>#</sup>



(b) Test curves of sample 2<sup>#</sup>

图 4 气硅 VIP 板内压整体测试曲线

Fig. 4 Overall testing curves of inner pressure of VIP with silica

### 2.2 短切丝玻璃纤维板

以玻璃纤维为芯材的 VIP 板,在真空度同等极低的情况下,导热系数比其他类 VIP 板更低,绝热保温性能更加优越。内部压强越低导热系数就越小,因此玻璃纤维 VIP 板的内压是较为重要的物理量。

将不同膜材种类、板材厚度及芯材尺寸等玻璃纤维短切丝 VIP 板作为样品(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、...)进行测试,发现无论样品的外在因素怎么变化,测试的结果曲线都比较接近,如图 5 所示,其中图 5(a)为整体结果测试曲线,膜材膨胀时没有瞬间突变的现象,曲线没有凸起峰,位移曲线均缓慢下降;图 5(b)是 10 s 后的局部放大图,整体曲线看似缓慢下降,实际上膜材在负压抽气过程中压力-位移都是呈锯齿阶梯形下降。结果证明玻璃纤维短切丝 VIP 在抽气负压一开始膜材就发生了膨胀,位移随压力下降而减小。

玻璃纤维芯材被压缩后制作成为短切丝 VIP 板,玻璃纤维本身具有很大的回弹性<sup>[5]</sup>,将膜材割离开可发现芯材能迅速膨胀至原来的 1.5~2.0

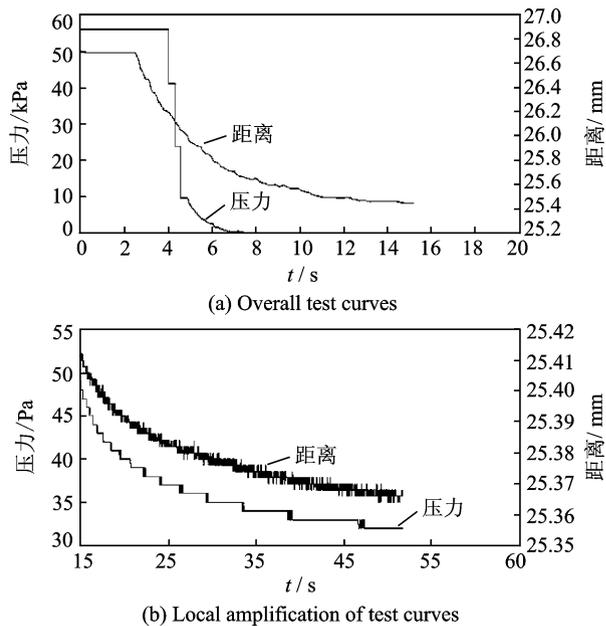


图 5 玻璃纤维短切丝 VIP 板内压测试曲线

Fig. 5 Testing curves of inner pressure of VIP with glass fiber

倍,玻璃纤维的弹性模量约  $0.008 \text{ GPa}^{[6]}$ 。在普通的透反显微镜下观察,短切丝 VIP 板内的玻璃纤维呈白色集聚微观平行的束状,少许部分也会呈相互交错状,长度均只有  $1.5 \text{ cm}$  左右。

试验证明  $5 \text{ cm}$  及  $5 \text{ cm}$  以上的吸盘口径均无法使膜材膨胀过程中与玻璃纤维芯材分离,也即无法测试出突变点。可推测当所用的吸盘口径低于玻璃纤维束的长度时,使玻璃纤维在负压抽气中会被吸盘口紧压,不会随着膜材的膨胀而膨胀。本文中重新制作了口径为  $1 \text{ cm}$ ,低于玻璃纤维长度的不锈钢吸盘,实物如图 6 所示。

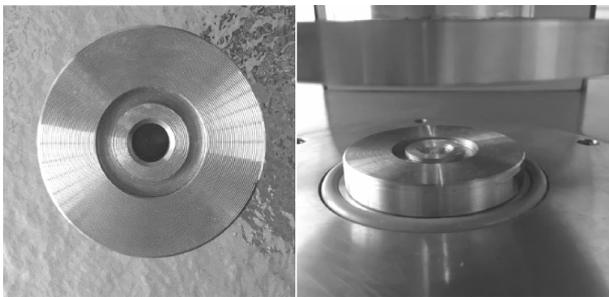


图 6 小吸盘加工件

Fig. 6 Small sucker

为保证多次试验所得测试值的准确性,将最后的测试值与 VIP 板的真实内压值进行对比。图 7 是在抽气封装玻璃纤维短切丝 VIP 板时,采用 SuperBee CVM201 实时检测到的 VIP 板内部压强度。因该测试仪气密性问题,较难抽到极低真空度,所以暂时将 VIP 板的真实内压值控制在  $18.7 \text{ Torr}$ ,即  $2487.1 \text{ Pa}$ 。

$1 \text{ cm}$  小口径吸盘下短切丝 VIP 板整体和局部放大的压力-位移测试曲线如图 8 所示。在图 8 的整体测试曲线中(图 8(a)),可以观察到位移曲线在  $6\sim 8 \text{ s}$  之间并不平稳,而是发生突变,出现凸起峰;将发生突变出现凸起峰区域放大(图 8(b)),可以观察到位移曲线凸起峰的中间位置对应的时间为  $7 \text{ s}$ ,对应的压力值是  $2400 \text{ Pa}$ ,与目标值  $2478.1 \text{ Pa}$  相差不大。

多次测试后的结果虽达不到特别精准的目标值,但在可容许的误差范围内,只有  $1 \text{ cm}$  甚至更小口径的金属吸盘才适用于玻璃纤维芯材 VIP 板的内压测试。

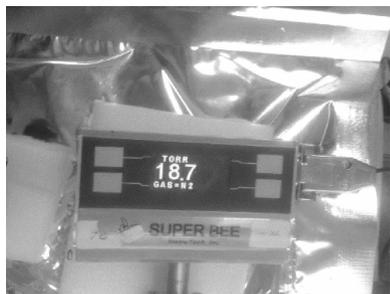


图 7 SuperBee 真空计所测 VIP 板内压真实值

Fig. 7 Real inner pressure of VIP tested by SuperBee vacuum gauge

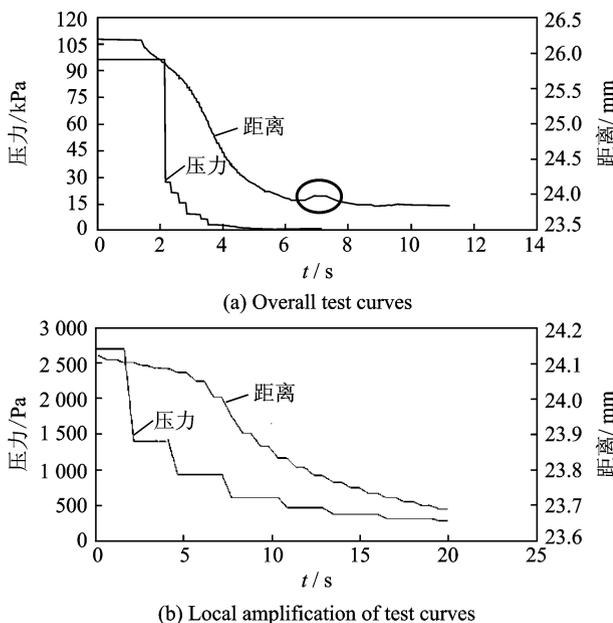


图 8 小口径下玻璃纤维短切丝 VIP 板内压测试曲线

Fig. 8 Testing curves of inner pressure of VIP with glass fiber using small diameter sucker

### 2.3 测试结果精度分析

为得到新型内压测试仪的精度分析,采用固定的气硅 VIP 板进行反复测试。测试值与 SuperBee 真空计显示的真实值进行多次对比分析,测试结果如表 1 所示。

表1 测试值与真实值对比

Tab. 1 Contrast between testing results and real results

序号	测试值/Pa	真实值/Pa	差值/Pa	相对误差/%
1	1 018	1 023	-5	0.48
2	1 032	1 023	9	0.87
3	1 029	1 023	6	0.59
4	1 021	1 023	-2	0.19
5	1 015	1 023	-8	0.78
6	1 028	1 023	5	0.49
7	1 030	1 023	7	0.68
平均值	1 024.71	1 023	1.71	

综合分析气硅板内压测量值与真实值的对比结果,可以得到:

(1)范围误差为

$$K = \frac{L}{a} = 1.67\% \quad (1)$$

式中: $K$ 为最大误差系数; $L$ 为最大误差范围; $a$ 为真实值。由范围误差结果可得出新型测试仪器精密密度较高。

(2)相对算术平均差值为

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n \cdot a} \quad (i=1,2,\dots,n) = 0.25\% \quad (2)$$

式中: $d$ 为各测量值与真值的差; $n$ 为测量次数。由平均误差结果可得出新型测试仪器准确度较高。

(3)最大引用误差为

$$\text{最大引用误差} = \frac{\text{仪器显示值的最大绝对误差}}{\text{该仪器相应量程的绝对值}} \times 100\% = 0.017\% \quad (3)$$

式中:仪器显示值的最大绝对误差为 17 Pa;仪器所能测量的最大量程为  $1 \times 10^5$  Pa。

由以上结果可以得出,新型内压测试仪对 VIP 板的内压测试结果正确度有较大提升,精确度较高,测量仪已经基本消除了系统误差。

### 3 线性拟合

VIP 板内部压强越低,其导热系数越小;反之,内部压强越高,其导热系数越高。导热系数与内部压强也存在某种函数关系式<sup>[7-8]</sup>。本文多次测试了气硅和玻璃纤维两种不同芯材 VIP 板的导热系数与内压压强,并采用 MATLAB 软件进行线性拟合。由于在实际拟合过程中导热系数变量  $y$  与内部压  $x$  函数关系并不确定,确立函数模型比较困难,因此本文先画出数据散点图,再根据图像大致走势利用最小二乘法来拟合函数曲线,不断优化和对比。

#### 3.1 玻璃纤维曲线拟合过程

(1)在 MATLAB 软件中输入实验数据,具体如表 2 所示。

(2)在 MATLAB 的命令窗口中,将玻璃纤维 VIP 板所有的内压值作为  $x$ ,相对应的导热系数作为  $y$ ,作为矩阵进行输入。

(3)调用曲线拟合工具,在此基础上输入 cftool,确认后选择为  $x$  data 和  $y$  data 赋值。

(4)出现系统默认的 Polynomial 模拟曲线后, MATLAB 将自动出现表达式,此表达式便是在多项式模型下采用最小二乘法获得的结果。

(5)通过散点图可以初步判断此曲线为幂函数,数学模型为  $y = \varphi(x) = Cx^A$ ,选择 Power 函数模型,Number of terms 选择 1。

(6)在 Result 窗口显示模拟的函数表达式为  $y = f(x) = 0.7061x^{0.471}$ 。同时还可得到误差平方项和(Sum of the squared errors, SSE)。SSE 代表拟合曲线的好坏,数值越大,表示拟合越差。本次拟合  $SSE = 2.278$ 。

(7)选择其他曲线拟合方法与幂函数拟合结果进行对比,确定使用幂函数作为模拟数学模型,此时在 Number of terms 中选择 2,得到的 SSE 更小,为 1.973,如图 9 所示。

(8)通过模拟得到最终函数表达式为:  $y = f(x) = 0.9241x^{0.4363} - 0.5888$ 。

表2 玻璃纤维 VIP 板内压强与导热系数测试结果

Tab. 2 Inner pressure and thermal conductivity of VIPs with glass fiber

样品编号	真空计示数/ mTorr	内压/Pa	导热系数/ ( $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ )
1#	14	1.8	1.20
2#	33	4.4	1.33
3#	68	9.0	1.65
4#	100	13.3	1.93
5#	301	40.0	3.35
6#	638	85.0	5.46
7#	1 220	162.0	8.38
8#	3 270	435.0	13.21
9#	8 930	1 188.0	19.34

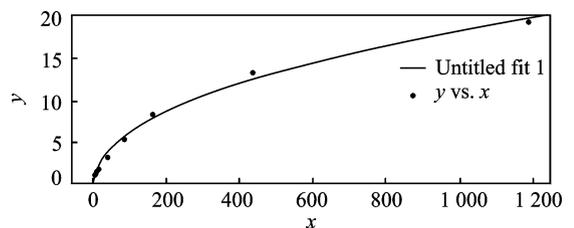


图9 玻璃纤维 VIP 板导热系数和内部压强线性拟合曲线

Fig. 9 Fitting relation between inner pressure and thermal conductivity of VIPs with glass fiber

#### 3.2 气硅 VIP 板曲线拟合过程

运用 MATLAB 软件重复之前操作,输入实验数据如表 3 所示,将气硅类 VIP 测得的导热系数

和内压强值写入 MATLAB 命令窗口;调用曲线拟合窗口。根据散点图可推测出两种模型:一种是 Polynomial(多项式)模型;一种是 Power(幂函数)模型。实验中三阶多项式拟合结果的  $SSE = 0.09324$ 。选用幂函数模型进行模拟时  $SSE = 3.321$ ,比第一种方法大。而两种模型的曲线大致相同,因此选用第一种模拟方法,如图 10 所示。最终确定气硅曲线通过幂函数模型模拟结果为: $f(x) = 1.473e^{-11}x^3 - 1.744e^{-7}x^2 + 0.001683x + 3.417$ 。

表 3 气硅 VIP 板内压强与导热系数测试结果

Tab. 3 Inner pressure and thermal conductivity of VIPs with silica

样品编号	真空计示数/ mTorr	内压/Pa	导热系数/ ( $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ )
1#	4 361	580	4.48
2#	5 489	730	4.60
3#	6 616	880	4.72
4#	7 143	950	4.90
5#	10 037	1 335	5.15
6#	30 075	4 000	8.40
7#	69 925	9 300	15.80
8#	101 503	135 00	30.60

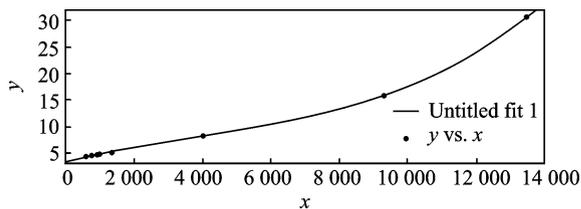


图 10 气硅 VIP 板导热系数和内部压强线性拟合曲线  
Fig. 10 Fitting relation between inner pressure and thermal conductivity of VIPs with silica

## 4 结 论

(1)利用 VIP 板膜材的负压膨胀法原理(逆真空法),改造研发新型台式 VIP 板内压测试仪。该仪器基本可以用于检测气硅或玻璃纤维短切丝芯材 VIP 板的内部压强值,测试结果精确度较高,与真实值对比误差约为 1.67%。

(2)新型台式 VIP 板内压测试仪的大口径金属吸盘(5 cm 及以上)不适用于玻璃纤维短切丝芯材 VIP 板内压值的检测,仅适合气硅类硬质芯材 VIP 板。玻璃纤维短切丝 VIP 板需采用更小的金属吸盘口径(1 cm 及以下)。

(3)气硅和玻璃纤维短切丝芯材的 VIP 板内压强越低,导热系数也就越低,两者都存在相近的函数关系式。玻璃纤维短切丝芯材 VIP 板导热系

数与内压强函数关系为: $y = f(x) = 0.9241x^{0.4363} - 0.5888$ ,气硅芯材 VIP 板导热系数与内压强函数关系为: $f(x) = 1.473e^{-11}x^3 - 1.744e^{-7}x^2 + 0.001683x + 3.417$ 。

## 参考文献:

- [1] SCHWAB H, HEINEMANN U, BECK A, et al. Permeation of different gases through foils used as envelopes for vacuum insulation panels[J]. Journal of Thermal Envelop and Building Science, 2005, 28(4): 293-317.
- [2] CAPS R, BEYRICHEN H, KRAUS D, et al. Quality control of vacuum insulation panels; Methods of measuring gas pressure[J]. Vacuum, 2008, 82(7): 691-699.
- [3] 朱万平. 真空绝热板内压检测设备的研发[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.  
ZHU Wanping. Research and development on the device for testing the internal pressure of vacuum insulation panel (VIP) nondestructively [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [4] ZHENG Qing, CHEN Zhaofeng. Quality control of vacuum insulation panels; An instrument for measuring internal pressure[C]//12th International Vacuum Insulation Symposium. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2015:261-264.
- [5] WU W P, CHEN Z F, ZHOU J M, et al. Thermal properties of vacuum insulation panels with glass fiber[J]. Advanced Materials Research, 2012, 446: 3753-3756.
- [6] BRUNNER S, STAHL T, GHAZI W K. An example of deteriorated vacuum insulation panels in a building facade[J]. Energy and Buildings, 2012, 54: 278-282.
- [7] 邸小波, 鲍崇高, 高义民, 等. 真空绝热板导热系数与板内真空度关系研究[J]. 真空, 2011, 48(3): 12-15.  
DI Xiaobo, BAO Conggao, GAO Yimin. Study on the relationship between the coefficient of vacuum insulation panel's thermal conductivity and vacuum degree[J]. Vacuum, 2011, 48(3): 12-15.
- [8] 张宁, 杨春光, 高霞. 真空绝热板内部真空度的影响因素分析及其改善措施[J]. 真空, 2010, 47(1): 19-22.  
ZHANG Ning, YANG Chunguang, GAO Xia. Internal vacuum degree of vacuum insulation panel influence factor analysis and improvement measures [J]. Vacuum, 2010, 47(1): 19-22.