

# 纤维隔热毡有效热导率测试方法研究

何 飞 赫晓东 赵淑媛

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080)

**文 摘** 纤维隔热材料热导率的测试是高马赫数可重复使用飞行器 (RLV) 金属热防护系统 (TPS) 研究中的一个难点。本文以 NASA Langley 研究中心一维稳态有效热导率测试装置为依据, 设计了测试温度达 1 600、压力在  $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^5$  Pa 的高温石墨平板炉, 并对该设备的设计原理、装置构造、测试方法以及数据采集等方面进行了讨论, 对三种国内不同厂家生产的高温纤维隔热毡的有效热导率进行了测试。结果表明, 该设备在经历一定时间的稳态处理后, 获得了稳定的热流密度, 进而得到不同温度下的一维稳态有效热导率。测试结果表明纤维隔热毡的有效热导率随温度的增加而增加, 在高温下, 辐射成为影响材料导热能力的主要因素。

**关键词** 纤维隔热毡, 有效热导率, 测试方法, 高温

## Testing Method of Effective Thermal Conductivity of Fibrous Insulations

He Fei He Xiaodong Zhao Shuyuan

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

**Abstract** Effective thermal conductivity measurement of fibrous insulations is a difficulty in the study of metallic thermal protection system (TPS) for reusable launch vehicles (RLV). According to the one dimension steady-state effective thermal conductivity testing apparatus invented by NASA Langley research center, a high temperature graphite flat stove is developed independently, whose main technical parameters are: the highest testing temperature is 1 600 and the range of pressure is between  $1 \times 10^{-3}$  and  $1 \times 10^5$  Pa. The principle, the instrumentation, testing method and data collection are analyzed in detail. Effective thermal conductivity of three domestic high temperature fibrous insulations is measured at different temperature. The stable heat flux density, from which effective thermal conductivity is calculated, is obtained after a period of thermal stable treating. The testing results showed that effective thermal conductivity of fibrous insulations is increased with the increase of temperature. At high temperature, radiation is the main factor influencing thermal transfer.

**Key words** Fibrous insulations, Effective thermal conductivity, Testing method, High temperature

### 1 前言

金属热防护系统 (TPS) 是新一代高马赫数可重复使用飞行器 (RLV) 防热的主要部分<sup>[1-2]</sup>。飞行器再入时由气动力加热引起的环境条件比较恶劣, TPS 内部的隔热材料可以承受  $1 \times 10^{-2} \sim 1.01 \times 10^5$  Pa 的压力, 同时隔热材料的表面温度高达 1 000。在这样的条件下, TPS 内往往填充着轻质、非承重、高温纤维隔热材料, 以保证飞行器结构在正常温度下工作。因此, 对纤维隔热材料热传导问题的研究成为金属 TPS 研究中必不可少的内容。

在过去几十年里, 国内外学者已经对纤维隔热材料的热传导做了大量的研究, 但是主要的工作只是集

中于小压力和小温度范围内, 开发的热导率分析仪器也主要集中于较小温度范围, 并且通过纤维隔热材料的热传导多种方式的复杂结合, 使得高温隔热材料的分析和设计变得困难<sup>[3]</sup>。由 NASA Langley 研究中心开发的一维稳态有效热导率测试装置<sup>[4-5]</sup>, 测试能力能够满足飞行器再入时所具有的环境压力和温度, 为高温恶劣环境材料热导率测试方法提供了参考。J. Marschall<sup>[6]</sup>等建立了纤维隔热材料在一定温度压力下的有效热导率模型, 并对此进行了数值模拟分析。H. L. Paul 等<sup>[7]</sup>构建了多种类型纤维的热导率模型, 并和 NASA 实验数据进行了比较。

本文主要对自主设计的高温石墨平板炉的设计

收稿日期: 2006 - 11 - 13; 修回日期: 2007 - 04 - 24

作者简介: 何飞, 1978 年出生, 博士, 主要从事隔热材料的研究

宇航材料工艺 2007 年 第 5 期

— 67 —

原理、装置、实验方法等进行了介绍,同时测试了三种不同国内厂家生产的纤维隔热材料。

## 2 测试原理

测定热导率<sup>[8]</sup>的方法——稳态平板法是基于试件内建立起一维稳态温度场的导热过程,以测定材料热导率的一种方法。由于平板试件的配置不同,可分为:单平板法;双平板法;平板比较法。这些方法的实验设备各有特点,但其关键的一点是在试件内设法建立起一维稳态温度场,以便于准确计量通过试件的热流及其两侧的表面温度。

纤维隔热材料(毡、毯)是一种由固相和气相组成的多孔材料,其导热能力一般由将纤维隔热材料看成结构连续、性质均匀的固体所形成的有效热导率来表征。本实验有效热导率的测试原理是将厚度一定的试样放入于两个平板间,设置一定的温度梯度,使用热电偶测量冷热边的温度,传感器在平板与样品之间和样品保持完好接触,再使用校正过的热流传感器测量通过样品的热流。因此可以使用测量的热流、热边和冷边的温度以及试样的厚度由 Fourier定律得出:

$$k_e = \frac{qL}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

式中, $q$ 为通过试样的稳态热流密度, $L$ 为试样的厚度, $T_1$ 为试样热边的温度, $T_2$ 为试样冷边的温度。

## 3 测试装置

参照美国 NASA Langley研究中心技术资料,以 ASTM - 201C为主要测试标准,设计了针对全尺寸 TPS样件的热导率测量为目的的高温石墨平板炉。

设备总体结构由真空加热室、真空获得与真空压力检测系统、放置试件的工作台升降机构、冷却水分配及循环系统、温度检测控制系统和支撑试件放置工作台的机架等组成。

热导率测试设备主要参数:最大试件尺寸为 450 mm × 450 mm × (5 ~ 80) mm;加热功率为 75 kW;电源电压为 3 ~ 380 V;冷态真空度为  $6.7 \times 10^{-3}$  Pa;最高工作温度为 1 600 °C;炉内压力调节范围  $10^{-3} \sim 10^5$  Pa;稳态加热时间 90 min;保温时间 > 90 min;温区内温差 15 °C。设备的装置示意图如图 1 所示<sup>[9]</sup>。

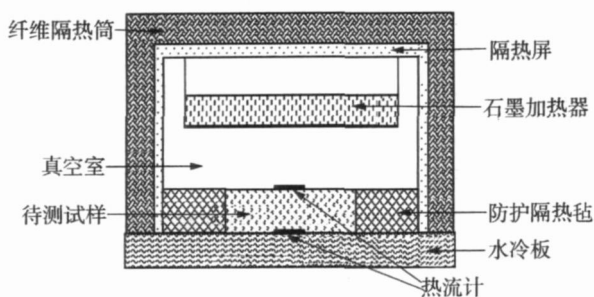


图 1 热导率测量试验示意图

Fig 1 Schematic picture of thermal conductivity apparatus

设备冷却装置采用水冷夹层结构。水冷面上端安放待测隔热试样,安放面直径为 1 000 mm,保证热量有足够的均布范围。加热装置悬挂在真空室顶端。采用平板形石墨加热器,该加热器制成三项折线式平板型。由于采用石墨加热体和综合隔热设计,使得样件加热能力从 NASA Langley研究中心的 1 000 °C 提高到 1 600 °C,拓展了防热系统测量评价范围。试样装好后,用 SVZ400 高真空硅脂密封设备结合处,构成真空室。该真空室可以提供  $1 \times 10^{-3}$  Pa 到常压的测试压力。测试在气态  $N_2$  环境下进行。用  $N_2$  取代空气是为了防止空气对石墨加热器的氧化,以及水蒸气进入真空室造成抽真空所需时间的增加。使用电脑所需数据系统搜集热电偶热流计的数据。通过所需的数据软件把热电偶数据转换成温度。

## 4 测试方法

以测试高铝质纤维隔热毡热导率为例说明该设备的测试方法。若测试试样中间的温度分布,需将双层或多层纤维隔热毡叠放在一起进行测试。需要知道每层的名义厚度、测量试样的密度、试样尺寸。

试样从下至上分三个位置需布置热电偶和热流计。

(1) 水冷板位置:将水冷板进行分区,在正中心划分出试样尺寸大小的形状及相应的测量区,在测量区内放五个 K 型热电偶和两个热流计分别进行温度和热流的测量,本项实验热流的测量采用建筑测量用 WYP 型板式硬测头热流计,热流计的尺寸为 110 mm × 110 mm × 2.5 mm,使用温度在 100 °C 以下。中心测量区的尺寸为 350 mm × 350 mm,按照图 2 的方式布置热流计和热电偶,热电偶放在正方形的中心和对称角线上,对角线上的热电偶与中心成对称布置,将热电偶放在如图 2 位置上后放上待测试样。

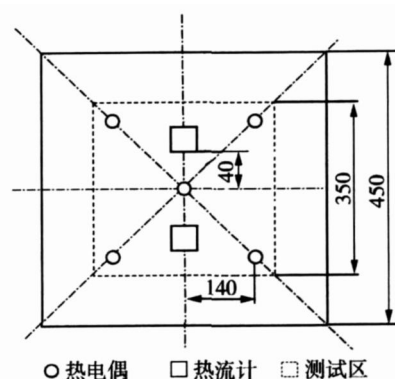


图 2 水冷板上热电偶及热流计的布置

Fig 2 Thermocouples and heat flux gages layout on water-cooled plate

(2) 试样中间:在双层试样的中间层上按照如图

3所示布置热电偶。

(3)试样上表面:试样上表面放 3个热电偶,按照图 4的方式布置热电偶的位置,热电偶和热流计的导线用陶瓷管绝热,将水冷板和试样与主体结构固定。

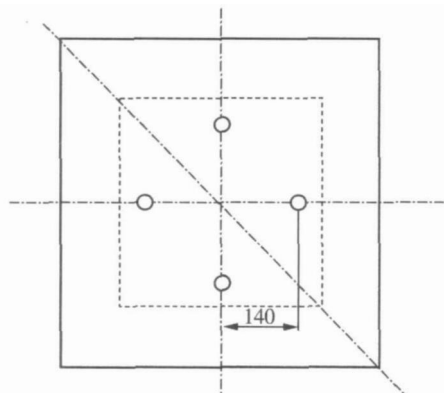


图 3 试样中间热电偶的布置

Fig 3 Thermocouples layout in middle of two samples

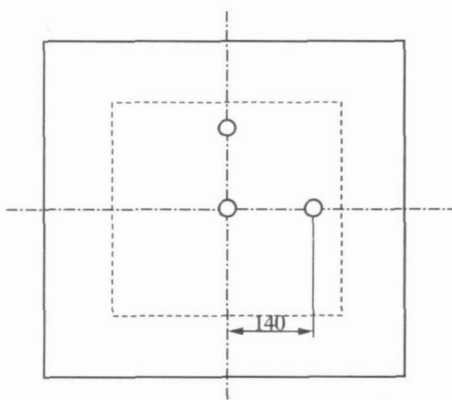


图 4 试样上表面热电偶的布置

Fig 4 Thermocouples layout on upper surface of sample

先给水冷夹层板通冷却水,将真空室抽真空至  $1 \times 10^{-2}$  Pa,温度设定在首个所需最低温度,然后对石墨加热器通电。通过改变石墨加热器的输出功率来调节试样上表面的温度,并保持在设定温度。达到稳态目标温度需要 3~5 h,一旦试样上表面温度稳定,真空室达到所需压力,并且所有的热电偶以及热流计示数不再变化,开始存储数据。然后将温度设定在下一个所需温度。依次测定相同压力下各温度的有效热导率,然后调整压力测得不同压力下试样的有效热导率。一般先测同一压力下的不同温度的所需值,再改变压力测下一组温度时的所需值。压力的控制是通过真空泵和扩散泵抽真空,然后调整通入氮气的量来达到的。在  $10^{-3} \sim 10^{-1}$  Pa 范围内的真空度可以调整控制。

试件的温度和热流数据的采集采用多路温度测量仪和计算机来实时记录。软件部分采用 LABVIEW 宇航材料工艺 2007年 第5期

自行编制温度采集程序。

### 5 数据采集和分析

把纤维隔热毡切割成  $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ ,分若干层均布于炉内,其间按图 2~图 4所示布置热电偶和热流计。测试热边温度分别在 100、200、300、400和 500 ,压力在 0.5 Pa时材料的热流密度。每间隔 2 s采集一个数据点。图 5给出了 1#试样在热边温度为 500 时,由热电偶分别在热边、中间、冷边测得的温度分布。图 6为冷边布置的热流计测得的热流密度分布。从图中可以看到,得到的温度和热流密度数据在经过大约  $2 \times 10^4$  s后趋于稳态。

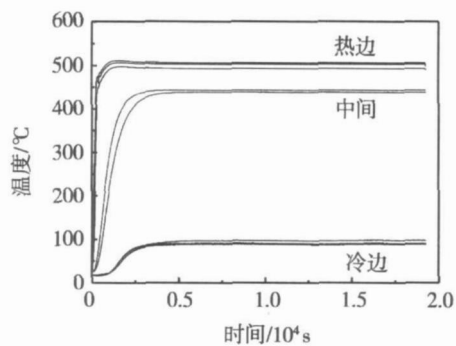


图 5 三个不同位置温度与时间关系图

Fig 5 Relationship of temperature and time in three different locations

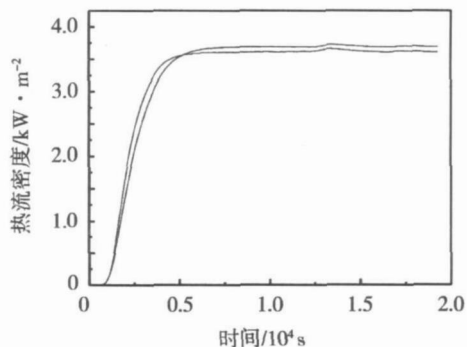


图 6 热流密度与时间的关系

Fig 6 Relationship of heat flux density vs time

表 1给出了 0.5 Pa时三种材料分别在 100、200、300、400和 500 时的实验数据和计算得到的有效热导率。

图 7为上述三种材料的有效热导率随温度变化的趋势。可以看到,三种纤维隔热毡的有效热导率都随着温度的增加而增加。但 400 以后,有效热导率的增幅加大,这是由于辐射对热导率的贡献在高温下成为主要影响因素。从得到的材料数据与国外报道的隔热材料热导率相比,其数值较国外产品高近一个数量级,尤其在高温阶段,材料热导率上升很快,说明国内相关产品在高温时热损失大,隔热性能差。

表 1 三种隔热毡有效热导率测试结果

Tab 1 Testing results of effective thermal conductivity of three fibrous insulations

隔热毡 试样	厚度 /mm	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	测试温度点 /	冷边温度 /	中间温度 /	热边温度 /	热流密度 /W·m <sup>-2</sup>	有效热导率 /W·(m·K) <sup>-1</sup>
1 <sup>#</sup>	57.5 (3层)	92.94	100	26.5	86.8	105.2	85.84	0.063
			200	36.0	171.3	205.8	402.52	0.136
			300	50.2	259.8	306.3	1013.84	0.228
			400	63.2	349.2	406.8	2033.48	0.340
			500	88.4	437.7	506.4	3688.80	0.507
2 <sup>#</sup>	47.6 (4层)	89.57	100	24.7	81.5	104.2	92.80	0.056
			200	28.4	151.2	204.0	380.48	0.103
			300	31.0	236.5	303.0	938.44	0.164
			400	42.5	320.1	402.5	1648.36	0.218
			500	65.5	405.2	502.5	2906.96	0.317
3 <sup>#</sup>	62.4 (4层)	152.90	100	24.2	80.1	103.1	70.76	0.056
			200	27.7	160.8	202.9	290.00	0.103
			300	34.3	243.1	301.7	668.16	0.156
			400	46.9	338.6	401.0	1356.04	0.239
			500	63.2	401.3	504.3	2765.24	0.391

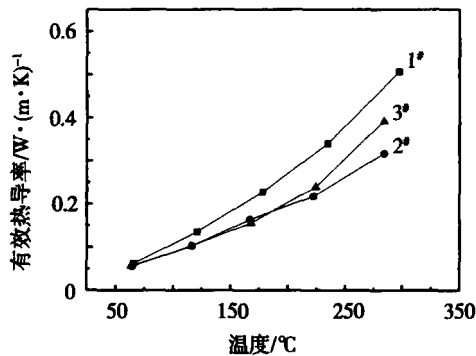


图 7 三种隔热毡的有效热导率随温度变化图

Fig 7 Variations of effective thermal conductivity of three insulations at different temperature

## 6 结论

为满足高马赫数可重复使用飞行器金属热防护系统用纤维隔热材料热导率的测试要求,设计了测试温度可达 1 600、压力范围在  $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^5$  Pa 的高温石墨平板炉。该设备满足一维稳态测试原理,由水冷板、真空室、石墨加热器以及相关的数据采集和分析设备组成,能够准确得到稳态下的热流密度,进而得到纤维隔热毡的有效热导率。测试结果表明,国内所用纤维隔热毡热导率随温度的增加而增加,在高温下,辐射成为影响材料导热能力的主要因素。

## 参考文献

1 Bösser M L, Chen R R, Schmidt I H et al Advanced

metallic thermal protection system development In: 40<sup>th</sup> aerospace sciences meeting & exhibit, AIAA 2002 - 0504, 2002

2 Dorsey J T, Potteet C C, Chen R R et al Metallic thermal protection system technology development: concepts, requirements and assessment overview. In: 40<sup>th</sup> aerospace sciences meeting & exhibit, AIAA 2002 - 0502, 2002

3 Kamran Daryabeigi Analysis and testing of high temperature fibrous insulation for reusable launch vehicles In: 37<sup>th</sup> AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, AIAA 99 - 1044, 1999

4 Kamran Daryabeigi Thermal analysis and design of high multi-layer fibrous insulation for re-entry aerodynamic heating In: 35<sup>th</sup> AIAA thermophysics conference, AIAA 2001 - 2834, 2001

5 Kamran Daryabeigi Effective thermal conductivity of high temperature insulations for reusable launch vehicles NASA/TM - 1999 - 208972

6 Jochen Marschall, Jesse Maddren, Jason Parks Internal radiation transport and effective thermal conductivity of fibrous ceramic insulation AIAA 2001 - 2822, 2001

7 Paul H L, Diller K R. Comparison of thermal insulation performance of fibrous materials for the advanced space suit Journal of Biomechanical Engineering, 2003; 125(10): 639 ~ 647

8 关振铎,张中太,焦金生. 无机材料物理性能. 北京:清华大学出版社,2005

9 赵淑媛. 金属热防护系统纤维隔热毯隔热性能研究. 哈尔滨工业大学硕士学位论文,2005

(编辑 李洪泉)