

# 耐高温隔热材料组合结构模拟研究与试验验证

王晓婷 张宏波 杨海龙 陈海坤 胡子君

(航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

**文 摘** 以热防护系统隔热组合结构中不同隔热材料厚度尺寸为计算变量,以飞行器主结构温度极值即最低背面温度为目标参数,以组合结构中第二层材料最高使用温度为约束条件建立隔热组合结构模型,并进行了石英灯考核验证。采用通用软件 ANSYS 进行一维瞬态有限元热分析,将模型计算结果和试验结果进行了全面对比,各项数据吻合良好。

**关键词** 隔热材料,组合结构,模拟,背面温度

中图分类号:TU55, TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.019

## High Temperature Resistant Heat Insulating Material Simulation and Experimental Verification

WANG Xiaoting ZHANG Hongbo YANG Hailong CHEN Haikun HU Zijun

(Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of  
Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Using different heat insulating materials thickness in the heat insulating composite structure of the heat protection system as the design variables, the temperature extremes of aircraft main structure (the minimum back temperature) as the target parameters, the maximum use temperature of the second layer material in the composite structure as the constraint condition, the heat insulating composite structure model is established and verified by the quartz lamp check test. Using ANSYS software for one-dimensional finite element transient thermal analysis, the model calculated results are comprehensive compared with the experimental results, all the data are found in good agreement. It has a certain theoretical guiding significance to the similar thermal insulation structure design and process optimization.

**Key words** Heat insulating material, Composite structure, Simulation, Back temperature

### 0 引言

根据飞行器的发展趋势和要求,热防护系统隔热结构需要的是密度低、隔热性能好、耐高温,可重复使用的高效隔热材料,其中密度低、隔热性能好的材料,耐温性较差,然而耐温高的材料隔热性能较差并且密度较高。因此多层隔热结构成为了新型飞行器防热结构的研究方向,它是综合利用多种隔热结构和材料进行优化组合达到最佳的防隔热效果。本文基于不同隔热材料的特性,利用通用有限元分析软件 ANSYS<sup>[1]</sup>,建立瞬态热分析模型,以热防护系统隔热结构中不同隔热材料厚度尺寸为设计变量,以飞行器主结构温度极值即最低背面温度为目标参数,以实际的

石英灯考核试验为依据,将计算结果和试验结果进行了全面对比,各项数据均吻合良好,验证隔热组合结构设计方案的合理性和可行性。

### 1 隔热材料组合结构模型建立与模拟研究

以两种典型的隔热材料为例建立模型进行模拟研究,第一种隔热材料为刚性隔热瓦,是目前美国航天飞机最主要的热防护材料之一,具有轻质、耐高温和较好力学性能等优点;第二种为硅基纳米隔热材料,是一种新型的高效隔热材料体系,其独特的纳米结构使得材料具有优异的隔热性能,但该材料的最高使用温度低于刚性隔热瓦,刚性隔热瓦和硅基纳米隔热材料的密度分别为 330<sup>[2]</sup> 和 400 kg/m<sup>3</sup>,热导率和

收稿日期:2013-10-30

作者简介:王晓婷,1986年出生,硕士,主要从事高效隔热材料的研究。E-mail:ting0314@126.com

比热容如表 1 所示。

表 1 隔热材料的基本热物理参数

Tab. 1 Basic thermal physical parameters of thermal insulating material

隔热材料	温度 /°C	热导率 /mW·(m·K) <sup>-1</sup>	比热容 /J·(kg·K) <sup>-1</sup>
刚性隔热瓦	30	50	850
	400	76	1050
	800	106	1310
	1200	138	1430
硅基纳米隔热材料	30	21	740
	400	32	1050
	800	47	1100
	1200	55	1130

通过对材料性能的比较得到,在高温区即加热面第一层材料应采用刚性隔热瓦,第二层应采用硅基纳米隔热材料(图 1)。确定隔热组合结构总厚度,通过对隔热组合结构两种隔热材料厚度变化的不同模型进行模拟得到最低背面温度。

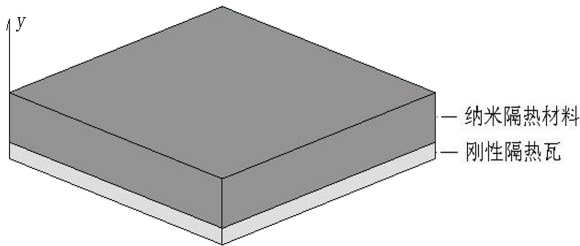


图 1 隔热组合结构模型示意图

Fig. 1 Diagram of heat insulating composite structure model

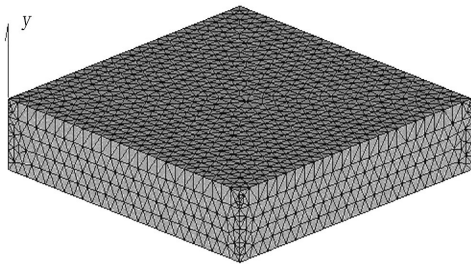


图 2 有限元网格划分图

Fig. 2 Finite element mesh diagram

使用 ANSYS 计算软件建立隔热材料组合结构的有限元模型,计算单元采用 6 面体 20 节点的 SOLID90 单元,模型网格划分如图 2 所示,共生成 23 776 个单元,35 580 个节点。对该有限元模型进行传热分析中采用了以下假设:

首先,隔热组合结构在初始时刻温度同周围环境相同,即认为模型初始温度为室温<sup>[3]</sup>;

其次,两层隔热材料之间空气或胶层缝隙较小,在实际分析中,认为该空气层或胶层在厚度方向温度

梯度为零,即不考虑其热阻;

最后,在组合结构中,沿结构外表面平面上在一定范围温度梯度很小,热量在组合结构中只沿厚度方向单向传递,即简化为无内热源一维传热问题,则在直角坐标系中无热源一维瞬态热分析问题的控制方程<sup>[4]</sup>为:

$$\rho c(T) \frac{\partial T(y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T(y,t)) \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} \right] \quad (1)$$

式中, $\lambda(T)$ 为热导率; $\rho$ 为材料密度; $c(T)$ 为比热容; $t$ 为时间; $y$ 为厚度方向坐标。初始和边界条件如下:

$$T(y,0) = T_0 \quad (2)$$

$$T(0,t) = T_1 \quad (3)$$

式中, $T_0$ 为室温, $T_1$ 为加载的热面温度,1 200°C。

隔热组合结构总厚度固定为  $L = 40$  mm,组合结构中两层材料厚度均为变量分别设为  $l_1$  和  $l_2$ ,得到:

$$l_1 + l_2 = L \quad (4)$$

式中, $l_1$  和  $l_2$  为刚性隔热瓦和硅基纳米隔热材料厚度, $l_1, l_2$  均为整数;因为硅基纳米隔热材料的隔热性能较好,所以第二层厚度  $l_2$  越大得到最终背温就会越低,但硅基纳米隔热材料的最高使用温度为  $T_{lim2}$ ,因此存在对第一层隔热材料最终背温的约束条件:

$$T_{back1} \leq T_{lim2} \quad (5)$$

式中, $T_{back1}$  为第一层材料的背温, $T_{lim2}$  为第二层材料的使用上限温度 1 050°C。

首先对单层刚性隔热瓦模型进行模拟,在材料一侧加载 1 200°C 高温,时长为 1 800 s,由于其背温要小于硅基纳米隔热材料最高使用温度为 1 050°C,因此需要确定能达到该极限温度的刚性隔热瓦最小整数厚度,不同厚度刚性隔热瓦的背温曲线如图 3 所示,当刚性隔热瓦厚度为 5 mm 时模拟试验背面温度为 1 023°C 满足约束条件,因此根据公式(4),第二层纳米隔热材料厚度为 35 mm,得到隔热组合结构为 5 mm 厚刚性隔热瓦和 35 mm 厚硅基纳米隔热材料。

对得到组合结构进行模拟研究得到第一层材料背面温度以及组合结构的背面温度,如图 4 所示,第一层隔热材料的背面温度为 1 111°C 超过第二层隔热材料的最高使用温度,这与单层刚性隔热瓦的背面温度结果存在差距,说明了第二层隔热材料的隔热性能对第一层材料背面温度结果存在很大影响,因此,建立模型模拟时不能单纯计算一种材料,需要考虑第二层材料对第一层材料背面温度影响,更改为两种材料的模型进行模拟才能得到较为准确的模拟计算结果。直接建立双层隔热组合结构模型,通过模拟计算得到组合结构背温结果,当已确定第一层材料的背温小于第二层材料的使用上限温度时,可能会得到的不同组

合厚度均满足公式(5),再比较这些组合结构的背温,得到背温最小值的组合结构,从而确定双层材料的各自厚度,计算流程图如图5所示。

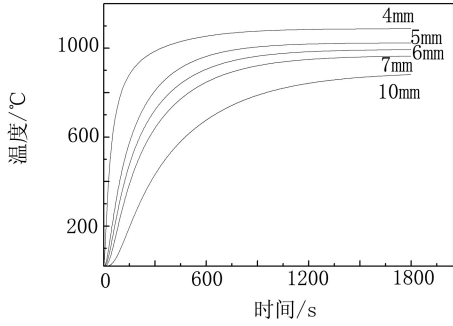


图3 不同厚度刚性隔热瓦模拟试验背温结果

Fig. 3 Back temperature results of different thickness rigid heat insulating material simulation

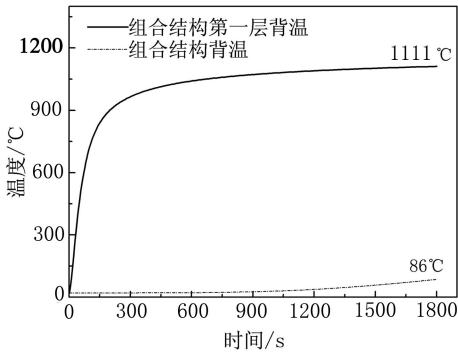


图4 组合结构背温模拟计算结果

Fig. 4 Back temperature simulation results of composite structure

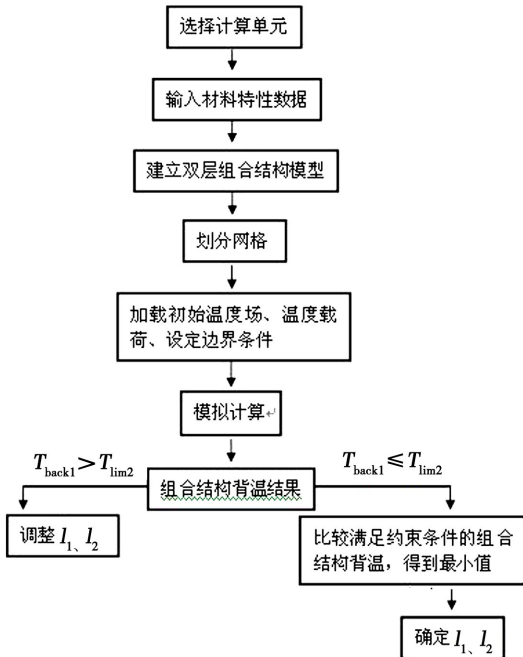


图5 计算流程示意图

Fig. 5 Diagram of calculation process

根据上述计算方法进行计算得到第一层刚性隔热瓦的厚度  $l_1$  为 10 mm、第二层硅基纳米隔热材料的厚度  $l_2$  为 30 mm 的组合结构。图6为模拟计算后该组合结构的温度分布云图,图7为模拟计算后该组合结构双层材料的背温曲线图,由图可知,第一条曲线在 1 800 s 时的背温为 1 026°C,未超出第二层隔热材料的最高使用温度 1 050°C,满足第一层隔热材料最终的背温约束条件,第二条曲线为隔热组合结构的背温曲线,可以看出组合结构背面温升缓慢,在 1 500 s 时背温在 50°C 左右,最终 1 800 s 时的背温仅为 73°C。

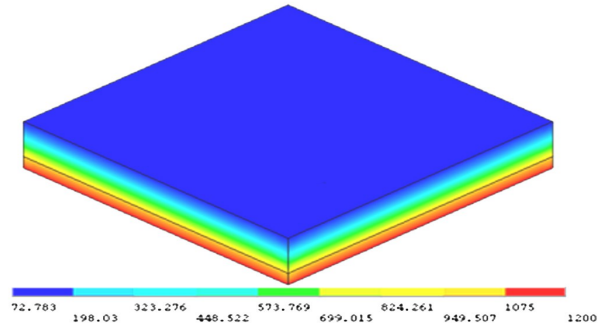


图6 温度分布云图

Fig. 6 Temperature distribution cloud diagram

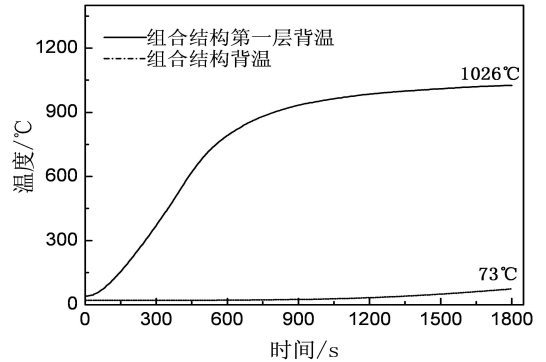


图7 模拟计算结果曲线图

Fig. 7 Curve diagram of simulation calculation results

## 2 试验验证

按模拟计算结果,设计了石英灯考核验证样件尺寸为 150 mm×150 mm×40 mm(其中第一层刚性隔热瓦为 10 mm,第二层硅基纳米隔热材料为 30 mm)。试验过程对温度变化情况进行实时监测,具体温度传感器测点安装位置要求如图8所示,其中第一个测点位于夹层结构内表面中心位置(第一层材料外表面),第二个测点位于组合结构外表面(第二层材料外表面),石英灯背温考核装置如图9所示。

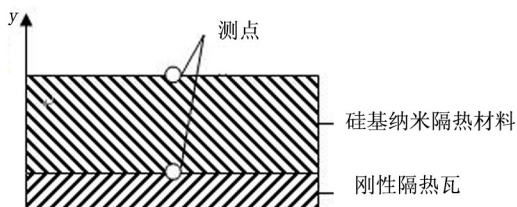


图8 组合结构试验件热电偶布置示意图

Fig. 8 Thermocouple layout diagram of composite structure test article

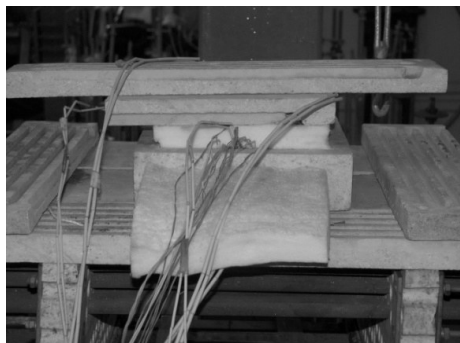
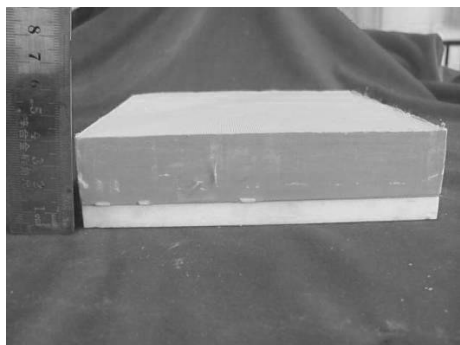


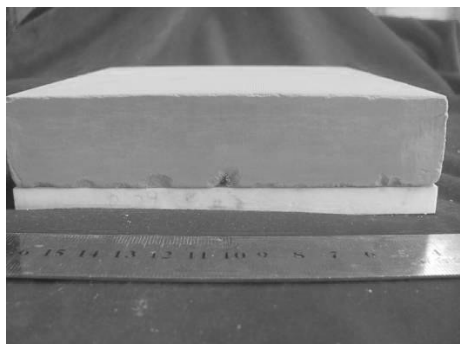
图9 石英灯背温试验考核装置

Fig. 9 Quartz lamp back temperature test check device

图10为隔热组合结构试验件石英灯背温考核前后照片。



(a) 考核前



(b) 考核后

图10 组合结构试验件考核前后照片

Fig. 10 Before and after check photos of composite structure test article

下层白色材料为刚性隔热瓦,上层灰色材料为硅基纳米隔热材料,对比试验件考核前后状态可以发现,经过背温考核后,两种材料均未出现变形开裂的现象。

图11为试验件在1200℃试验考核得到的背面温升曲线,结果显示,第一条曲线在1800s时的背温为1043℃,未超出第二层隔热材料的最高使用温度1050℃,满足第一层隔热材料最终背温的约束条件,在1800s时隔热组合结构背面温度约为67℃。

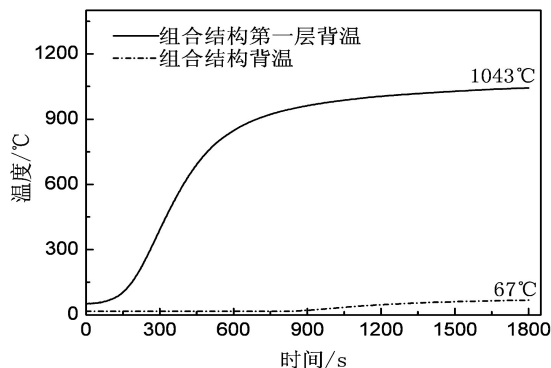


图11 背温试验考核结果

Fig. 11 Check result of back temperature test

### 3 结果讨论

图12为模拟计算和试验考核给出的隔热组合结构件的背面温升曲线,可以看出隔热组合结构的模拟计算与试验结果具有良好的一致性,表明这两种研究方式共同验证了本文计算方法得到的隔热组合结构的合理性和可靠性。

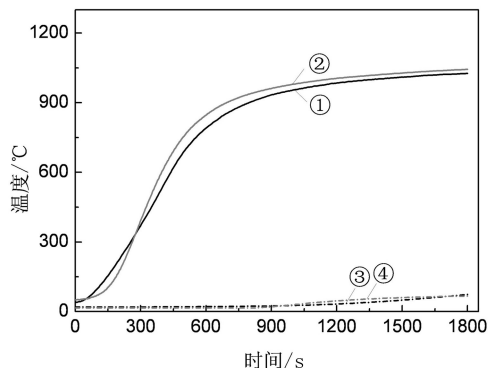


图12 模拟计算与实测试验结果图

Fig. 12 Simulation calculation and actual test results  
①模拟组合结构第一层背温;②实测组合结构第一层背温;  
③模拟组合结构背温;④实测组合结构背温。

虽然计算和试验结果的曲线走势基本相同,但是通过模拟计算得到的第一层材料背温的升温曲线比试验考核曲线出现拐点的时间要晚,模拟计算值比试验值略滞后,并且1800s时的模拟计算得到的最终

背温相比试验考核的略低,造成这些现象的可能原因是:首先,本文采用的刚性隔热瓦与纳米隔热材料都具有超低热导率,目前国际以及国内没有适用于测试具有超低热导率的隔热材料的测试标准<sup>[5]</sup>,前述的隔热材料的不同温度下的热导率仅作为参考,与材料实际热导率可能存在一定误差;其次,纳米隔热材料在空气环境中具有较高的吸潮率,在模拟计算过程中并未考虑材料内水汽对背温考核试验的影响;最后,模拟计算中模型以及环境为绝对理想状态,这与实际试验环境存在差别。

#### 4 结论

通过有限元分析软件 ANSYS,以第二层隔热材料的最高使用温度为约束条件,通过得到满足约束条件的组合结构的最小背温值来确定双层材料的各自厚度尺寸,从而最终建立热防护系统的隔热组合结构模型。对该组合结构试验件进行石英灯背温考核,通过将模拟计算与试验考核结果相比较,背温曲线走势基本相同,验证了该方法得到的隔热组合结构准确性和合理性。对于多层组合结构设计,理论计算可大幅

度降低试验量,可以以较快速度得到最佳组合结构方案。本文计算方法同样适用于多台阶加载温度、多层(>2层)防隔热组合结构设计,本文模拟计算与试验结果为同类隔热结构与工艺优化提供重要参考依据。

#### 参考文献

- [1] 张朝晖. ANSYS 12.0 热分析教程与实例解析[M]. 北京:中国铁道出版社,2010:11-12
- [2] 孙陈诚. 改性陶瓷瓦隔热材料制备和性能研究[C] //第十四届全国复合材料学术会议,北京,2006
- [3] 徐超,张铎. 高超声速飞行器热防护系统尺寸优化设计[J]. 中国空间科学技术,2007(1):65-69
- [4] Saeed Moaveni. Finite element analysis-theory and application with ANSYS[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2009:205-216
- [5] 胡子君. 纳米超级隔热材料及其最新研究进展[J]. 中国材料进展,2012(8):65-69

(编辑 任涛)

---

## 特别提示

本刊从2014年第1期开始增加中图分类号和DOI号,以便于文章在全球数字图书馆平台——北京英捷特数字出版平台上被查询检索。敬请各位作者在投本刊的稿件中一定要标注中图分类号。另外,在网上投稿完成后,请及时将稿件的保密审查证明和论文著作权转让书原件寄到编辑部,编辑部在收到证明文件才开始送专家审稿。

感谢支持与配合!

· 本刊编辑部 ·