

# 气动压力对柔性热防护结构 隔热性能的影响

秦 强 任青梅 王 琦 蒋军亮 成 竹

(中国飞机强度研究所,西安 710065)

**文 摘** 提出“等效导热热阻”这一参数来反映柔性热防护结构的隔热性能,用石英灯辐射加热和机械加压的方式来模拟柔性热防护结构服役过程中的气动热/压环境,根据所做热试验的结果数据研究了在一定温度下,气动压力对柔性热防护结构等效导热热阻的影响规律。结果表明:随着气动压力的增大,柔性热防护结构的隔热性能呈非线性下降趋势,因此在对柔性热防护结构设计时,必须考虑其服役过程中表面气动压力对其隔热性能的影响。

**关键词** 柔性热防护结构,等效导热热阻,气动压力,地面模拟试验

## Analysis of Influence of Aerodynamic Pressure on Properties of Flexible Thermal Protection Structure Insulation

Qin Qiang Ren Qingmei Wang Qi Jiang Junliang Cheng Zhu

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065)

**Abstract** In this paper, one parameter called "equivalent thermal resistance" was raised to reflect insulation of flexible thermal protection structure, and experiments were conducted to analyze the law between this parameter and aerodynamic pressure on the surface of flexible thermal protection structure. The insulation property of flexible thermal protection structure non-linearly declines as aerodynamic pressure rises. So the effect of aerodynamic pressure on insulation property of flexible thermal protection structure should be taken into account in designing.

**Key words** Flexible thermal protection structure, Equivalent thermal resistance, Aerodynamic pressure, Ground-based experimental simulation

### 1 引言

热防护结构(TPS)是保证高超声速飞行器(HV)安全飞行的关键部件之一,其传热、强度分析,优化设计以及试验验证一直是相关科研工作者研究的重点。柔性TPS是应用时间最早、应用经验最多的热防护结构之一。目前,对柔性TPS隔热性能研究的重点是:对其常用隔热材料——陶瓷纤维隔热毡的内部传热机理方面的理论分析和有效热导率方面的数值预报与试验测试<sup>[1-5]</sup>。根据研究结果主要得出了以下两个结论:(1)陶瓷纤维隔热毡内部的主要传热方式有两种,一是气相和固相的热传导,二是热辐射,其内部对流换热很小可以忽略,在低温时以第一种传热方

式为主,在高温时以第二种传热方式为主;(2)陶瓷纤维隔热毡的热导率 $k$ 与自身温度 $T$ 、所处环境的压力有很大关系。因陶瓷纤维隔热毡材料内部多为孔隙结构,改变环境压力等于改变了孔隙间残留气体介质的传热特性,从而影响了整体陶瓷纤维隔热毡的导热能力。

HV在高空高速飞行时,覆盖其表面的柔性TPS,一方面其隔热材料内部处于高空低压环境,另一方面其外表面承受着高速气流冲刷作用,形成了表面较高的气动压力 $p$ 。本文主要研究气动压力 $p$ 对柔性TPS隔热性能的影响,确立能够表征柔性TPS隔热性能的参数——等效导热热阻 $R_{eq}$ ,建立相应的热实验方

法,模拟柔性 TPS 服役过程中的气动热/压环境,测试在一定温度下气动压力  $p$  对柔性 TPS 等效导热热阻  $R_{eq}$  的影响。

## 2 试验

### 2.1 试验对象

柔性 TPS 结构形式,如图 1 所示。从图中可以看出柔性绝热毡是通过有机胶以胶接形式与飞行器结构(用钛合金平板模拟)相连的柔性绝热毡在实际使用当中,由于添加了有机胶层、纤维织物及涂层等热阻元件和附加了各层之间的接触热阻,总共研究了 A、B、C 三件相同材质与厚度的柔性 TPS。

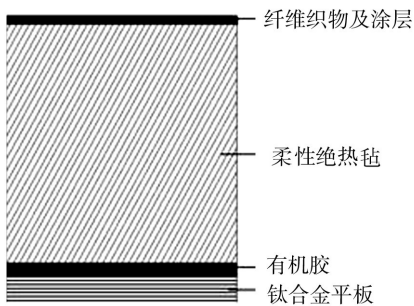


图 1 柔性 TPS 结构形式

Fig. 1 Structure form of flexible TPS

### 2.2 试验装置

在中国飞机强度研究所热强度研究室设计的机械加压热试验平台(图 2)上进行的,其中匀热板的材质选为铜<sup>[6-7]</sup>。控制原理如图 3 所示。

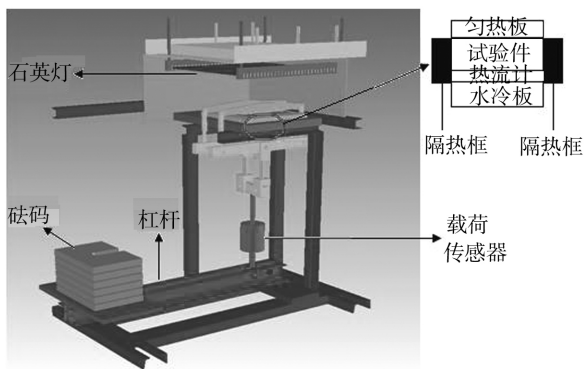


图 2 机械加压热试验平台

Fig. 2 Thermal experimental platform of mechanical pressure

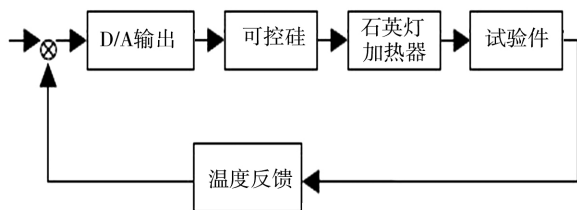


图 3 温度控制原理

Fig. 3 Temperature control principle

### 2.3 试验原理

柔性 TPS 所用的隔热材料柔性陶瓷纤维绝热毡是多孔隙、不连续、不均匀的介质,其内部传热是固相纤

维体的导热、孔隙间气体的导热与孔隙间的辐射换热高度耦合的复杂传热。为了可以应用一般的传热理论和公式对柔性 TPS 隔热性能进行直接分析评价,引入“等效导热热阻”参数,应用这一参数时就等于把柔性 TPS 等效为多层连续、均匀固体热阻元件的串联,这样柔性 TPS 的等效导热热阻  $R_{eq}$  可以表示为:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_c \quad (1)$$

式中,  $R_1$  为纤维织物及涂层的热阻;  $R_2$  为柔性绝热毡的热阻;  $R_3$  为有机胶的热阻;  $R_4$  为钛合金平板热阻;  $R_c$  为各层材料间的接触热阻之和。

把柔性 TPS 内部的传热方式等效为导热这一种方式,根据传热学中的傅里叶导热公式与热阻的概念,推导出柔性 TPS 整体等效导热热阻另一表达式:

$$R_{eq} = \frac{T_H - T_C}{q} \quad (2)$$

式中,  $T_H$ 、 $T_C$  为柔性 TPS 试件的热、冷边界温度,  $q$  为垂直通过柔性 TPS 试件的热流密度。为了消除匀热板对  $R_{eq}$  测算结果的影响,经简单的数学推导就可以得出柔性 TPS 试件  $R_{eq}$  的最终计算式为:

$$R_{eq} = \frac{T_H - T_C}{q} - \frac{l_1}{\lambda_1} \quad (3)$$

式中,  $l_1$  为匀热板的厚度,  $\lambda_1$  为匀热板材料的热导率。

### 2.4 试验过程与结果

由于柔性 TPS 容易受潮,而潮湿度对其隔热性能有较大影响,所以在试验前,对柔性 TPS 试件进行了烘干处理。利用石英灯加热器及控制系统,使匀热板的温度维持在 873 K,当薄膜热流计输出的热流密度数据与冷面温度数据达到稳定后,根据柔性 TPS 试件的热面处的气动压力  $p$  要求,在杠杆的末端施加砝码(图 2),直到载荷传感器的数据为目标值后,停止加砝码,然后等薄膜热流计输出的热流密度数据与冷面温度数据再次稳定后,记录下此时的热流密度与温度。然后继续按柔性 TPS 试件热面处的气动压力  $p$  要求进行第二次加砝码……。这样便得出了不同气动压力  $p$  下通过柔性 TPS 试件的热流密度及冷面温度,根据公式(3),最终得出了图 4 中所示的测试结果,对应的平均温度为 583 K,其中等效导热热阻进行了无量纲化处理,并不影响趋势性判断结果。

从图 4 可以看出,柔性 TPS 试件的等效导热热阻  $R_{eq}$  逐渐减小,表示其隔热性能逐渐下降。究其原因主要是柔性 TPS 试件在模拟的气动压力作用下产生了压缩变形,其实际隔热厚度变小,从而导致了等效导热热阻  $R_{eq}$  的减小。而刚性 TPS(陶瓷防热瓦、金属 TPS)的承压能力较强,不会在气动压力作用下产生压缩变形,因此气动压力对其隔热性能没有影响。

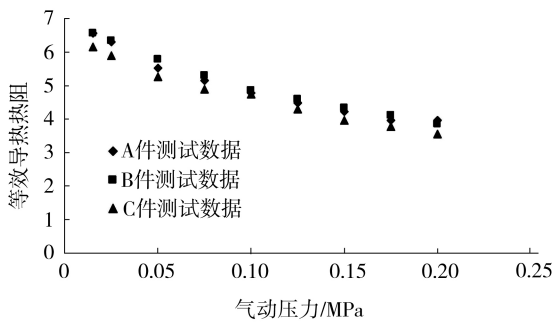


图4 柔性TPS试件  $R_{eq} - p$  关系

Fig. 4  $R_{eq} - p$  of flexible TPS

### 3 结论

模拟了柔性TPS服役过程中的气动热/压环境,通过热试验研究了在一定温度下,柔性TPS表面的气动压力对其隔热性能的影响。研究表明:柔性TPS的隔热性能随着其表面气动压力的增大而呈现非线性下降趋势。因此在对柔性TPS进行设计时,不仅要考虑其服役过程中高空低压环境对其隔热性能的影响,而且要考虑表面气动压力对其隔热性能的影响。

#### 参考文献

(编辑 李洪泉)

(上接第68页)

### 3 结论

(1) 1 500℃ 静态抗氧化实验结果表明 G-P-10ZrB<sub>2</sub> 的抗氧化性能优于未进行基体改性的复合材料体系。

(2) 通过热力学计算分析了 G-P-10ZrB<sub>2</sub> 碳基材料在制备和应用过程中改性粒子与基体材料稳定共存的热力学条件,并得到了实验结果的验证。

(3) 通过标准状态下 ZrB<sub>2</sub> 与 O<sub>2</sub>、C 可能发生反应的标准 Gibbs 自由能与温度的关系计算结果表明,在氧化实验时,ZrB<sub>2</sub> 被氧化生成 ZrO<sub>2</sub> 和液态 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,ZrO<sub>2</sub> 和液态 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 能共同起到防止碳基复合材料的进一步氧化的作用。

#### 参考文献

[1] Fitzer E. The future of carbon-carbon composites[J]. Carbon, 1987,25(2):163-190

[2] Awasthi S, Wood J L. C/C composite materials for aircraft brakes[J]. Adv. Ceram. Mater., 1988, 3(5):449-451

[3] 罗瑞盈,李东生. 提高碳/碳复合材料抗氧化性能的一种新途径[J]. 宇航学报,1998,19(4):95

[4] 刘桂香. 炭/炭复合材料的抗氧化研究[J]. 炭素, 2002(24):32-39

[5] Fergus J W, Worrell W L. Silicon-carbide-boron-containing coatings for the oxidation protection of graphite[J]. Carbon, 1995,33(4):537-543

[6] Ehrburger P, Baranne P, Lahaye J. Inhibition of the oxida-

[1] Marshall J, Maddren J. Internal radiation transport and effective thermal conductivity of fibrous ceramic insulation [D]. AIAA 2001-2822,2001

[2] Kamran Daryabeigi. Heat transfer in high-temperature fibrous insulation[D]. AIAA 2002-3332,2002

[3] 解维华,张博明,杜善义,等. 高温绝热毡有效热导率的理论分析与实验研究[J]. 材料研究学报,2006,20(6):571-575

[4] 闫长海,孟松鹤,杜善义,等. 金属热防护系统纤维隔热材料的传热分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2006,36(4):472-475

[5] Robert Siegel. Transient effects of radiative transfer in semitransparent materials[J]. International Journal of Engineering Science,1998,36:1701-1739

[6] ASTM Standard C 411-04: Standard test method for hot-surface performance of high-temperature thermal insulation [D]. 2004 Annual Book of ASTM Standards, Sep. 1, 2004

[7] ASTM Standard C 177-04: Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus [D]. 2004 Annual Book of ASTM Standards, Nov. 1, 2004

[8] Amamoto O, Sasamoto T, Inagaki M. Effect of mullite coating film on oxidation resistance of carbon materials with SiC-gradient[J]. J. Mater. Sci. Lett., 2000, 19(12):1053-1055

[9] Ckee D W. Oxidation protection of carbon materials// Throrer P A ed. Chemistry and physics of carbon[M]. New York, Dekker (California. USA): American Carbon Society, 1991(23):173-222

[10] Park S J, Seo M K. The effects of MoSi<sub>2</sub> on the oxidation behavior of carbon/carbon composites[J]. Carbon, 2001,39(8):1229-1235

[11] Lobiondo N E, Jones L E, Clare A G. Halogenated glass systems for the protection of structural carbon-carbon composites [J]. Carbon, 1995,33(4):499-508

[12] Fahrenholtz W G, Hilmas G E, Talmy I G. Refractory diborides of zirconium and hafnium[J]. Journal of the American ceramic Sociey, 2007,90(5):1347-1364

[13] 周红英,刘建军,黄寒星. 碳化温度对 C/C 复合材料微观结构及热性能的影响[J]. 宇航材料工艺,2005,35(2):47-51

[14] Parthasarathy T A, Rapp R A, Opeka M, et al. A model for the oxidation of ZrB<sub>2</sub>, HfB<sub>2</sub> and TiB<sub>2</sub>[J]. Acta Materialia, 2007,(55):5999-6010

[15] 梁英教,车荫昌. 无机物热力学数据[M]. 沈阳:东北大学出版社,1993

(编辑 任涛)