

低密度材料防热机理及热响应数值模拟

王淑华 张亮 张友华

(中国航空气动力技术研究院,北京 100074)

文 摘 介绍了用于飞船返回舱的低密度材料防热机理及热响应数值模拟方法。采用分层模型建立多层结构一维热传导方程,计算了低密度材料温度分布,并与电弧加热器试验结果作了比较,两者符合较好。

关键词 防热材料,热防护,数值模拟

Thermal Protection Mechanism and Numerical Simulation of Thermal Response for Low Density Materials

Wang Shuhua Zhang Liang Zhang Youhua

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

Abstract The thermal protection mechanism of low-density thermal material and numerical simulation of thermal response for re-entry module are presented. The temperature distribution of low density thermal material was calculated by using one-dimensional thermal conduction equation of multilayer structure built by layered model. The comparison between calculation and test results of ARC heater showed good agreements.

Key words Thermal material, Thermal protection, Numerical simulation

1 引言

热防护设计方案是关系到飞行器成败的主要问题,而热防护技术的关键是根据飞行器气动加热特点采用不同的防热结构材料。再入航天器要求热防护系统外层具有良好的烧蚀性能、内层有隔热性能。如美国第一代航天飞机机身高温区采用可重复使用的表面隔热材料陶瓷瓦(HRSI),低温区采用低温防热瓦^[1~2]。文献[3]介绍了多层结构的概念、多层结构的配置及优化设计。文献[4]介绍飞船返回舱采用的低密度有机硅高分子防热材料。

本文以飞船返回舱的材料为例,研究低密度有机硅防热材料防热机理,采用分层模型建立多层结构热传导方程,并利用电弧加热器地面实验,验证数值模拟的合理性。

2 低密度材料防热机理

低密度有机硅防热材料的防热机理是:材料在加热过程中,经历两次热解,形成多层结构。第一次裂

解(约 473 ~ 573 K 开始)产生低分子 H_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2 和环状硅氧烷;二次裂解环状硅氧烷在 1 000 K 左右发生,生成产物为 H_2 、 CH_4 、 SiO 、 SiO_2 、 C 等。二次裂解条件与温度、压力和有无氧的存在有关。材料裂解后,气体逸出表面, SiO_2 、填料残渣留下。因此低密度有机硅烧蚀后外表面是一层坚实的硬壳,呈现膨胀,属熔融的 SiO_2 ;内部形成空腔层(填料残渣,密度较低),最内层为原始材料层,此层内材料没有发生热解。在这三层的两个交界处有很薄的过渡区,材料在热解时有热解气体注入边界层,起到热阻塞效应。表面的膨胀和空腔层形成,能使材料起到很好的隔热作用。

3 低密度材料热响应的数值模拟

3.1 有机硅多层结构材料热传导方程

采用多层结构材料计算模型,满足以下热传导方程:

收稿日期:2009-02-05

作者简介:王淑华,1939 年出生,研究员,主要从事气动热学研究

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + m_p \bar{C}_p \frac{\partial T}{\partial y} + \omega_p \Delta H_p \quad (1)$$

式中, ρ 、 K 、 C_p 分别为结构材料的密度、热导率、比热容, m_p 为热解气体质量流率; \bar{C}_p 为热解气体比热容; ω_p 为热解气体质量生成率; ΔH_p 为分解热。

解方程(1), 需给出确定 ω_p 的数学公式, 对仅有一次热解反应的聚合物, ω_p 可以由 Arrhenius 动力学公式表示, 即

$$\omega_p = \frac{\partial \rho}{\partial t} = K_0 \rho^n \left(K \frac{\rho' - \rho}{\rho''} \right)^n \exp(-E/RT) \quad (2)$$

式中, ρ'' 、 ρ' 分别为聚合物热解前、后的密度; K_0 为频率因子; E 为活化能; n 为反应级数; R 为气体常数。

当出现二次热解时, 密度不再是单调变化, 而是呈 U 字形变化, 对此目前还没有合适的动力学公式可予描述。

为了解决由于二次热解产生的上述困难, 采用了两个间断面的简化模型, 即用两个间断面分别代替两个热解区域, 这个简化模型能描述由于热解引起密度变化的物理规律。文献[4]介绍了有机硅多层结构热响应的计算模型及公式。

3.2 分层物理模型与基本方程

采用简化模型将低密度有机硅材料在烧蚀过程中的行为分成如图 1 所示的三个区域。

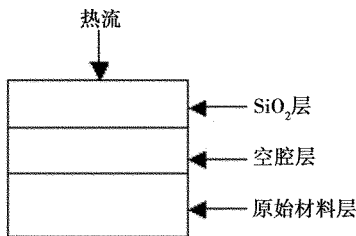


图 1 有机硅分层示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of organic silicon with different layer

外层为 SiO_2 层, 第二层为空腔层, 第三层为原始材料层。假定热解反应在间断面上进行, 这样各层热响应所满足的基本方程和边界条件如下。

(1) 基本方程

SiO_2 层

$$\rho_1 C_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) + m_{p1} \bar{C}_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial y} \quad (3)$$

空腔层

$$\rho_2 C_{p2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) + m_{p2} \bar{C}_{p2} \frac{\partial T_2}{\partial y} \quad (4)$$

原始材料层

$$\rho_3 C_{p3} \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \right) \quad (5)$$

(2) 边界条件

$$y = \bar{x} \quad (\bar{x} \text{ 为烧蚀厚度})$$

$$-K_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \psi q_{or} \left(1 - \frac{h_w}{h_r} \right) - \varepsilon \sigma T_w^4 + m_c \Delta H_c \quad (6)$$

式中, m_c 为碳的质量损失率; ΔH_c 为燃烧热, ψ 为阻塞因子。

$$y = \bar{x} + x_1 \quad (x_1 \text{ 为 } \text{SiO}_2 \text{ 层厚度})$$

$$\left. \begin{aligned} -K_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= -K_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} + m_{p1} \Delta H_{p1} \\ T_1 &= T_2 = T_a \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, T_a 为一次热解温度; m_{p1} 为一次热解率。

$$y = \bar{x} + x_1 + x_2 \quad (x_2 \text{ 为空腔层厚度})$$

$$\left. \begin{aligned} -K_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= -K_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} + m_{p2} \Delta H_{p2} \\ T_2 &= T_3 = T_b \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, T_b 为二次热解温度; m_{p2} 为二次热解率。

$$y = \bar{x} + x_1 + x_2 + x_3 \quad (x_3 \text{ 为原始材料层厚度})$$

$$-K_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

其中

$$m_c = K_0 e^{(-E/RT_w)} \left(\frac{\bar{M}}{M_{O_2}} P_e \right)^{1/2}$$

$$\psi = 1 - a(m_p + m_c) h_r / q_{or}$$

$$a = \begin{cases} 0.58 & \text{层流} \\ 0.20 & \text{湍流} \end{cases}$$

$$K_0 = 0.685 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{mPa}^{1/2} \cdot \text{s})$$

$$E/R = 2.13 \times 10^4 \text{ K}$$

$$\bar{M} = 29 \quad M_{O_2} = 32$$

(3) 初始条件

$$T_i(y) = T_0 \quad i = 1, 3$$

3.3 分层模型的数值模拟

为方便计算, 作以下动坐标变换, 令

$$\eta_1 = \frac{y - \bar{x}}{x_1}$$

$$\eta_2 = \frac{y - \bar{x} - x_1}{x_2}$$

$$\eta_3 = \frac{y - \bar{x} - x_1 - x_2}{x_3}$$

在 $(t - \eta_1)$ 、 $(t - \eta_2)$ 、 $(t - \eta_3)$ 的坐标系内, 方程(3)~(5)可写成如下标准形式:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = A_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial \eta_i^2} + B_i \frac{\partial T_i}{\partial \eta_i} \quad (10)$$

式中,

$i=1$ SiO_2 层;

$$A_1 = \frac{K_1}{\rho_1 C_{p1} x_1^2}$$

$$B_1 = \frac{1}{x_1} \left(\frac{d\bar{x}}{dt} + \eta_1 \frac{d\bar{x}_1}{dt} + m_{p1} \bar{C}_{p1} / \rho_1 C_{p1} \right)$$

$i=2$ 空腔层

$$A_2 = \frac{K_2}{\rho_2 C_{p2} x_2^2}$$

$$B_2 = \frac{1}{x_2} \left(\frac{d\bar{x}}{dt} + \frac{dx_1}{dt} + \eta_2 \frac{dx_2}{dt} + m_{p2} \bar{C}_{p2} / \rho_2 C_{p2} \right)$$

$i=3$ 原始材料层

$$A_3 = \frac{K_3}{\rho_3 C_{p3} x_3^2}$$

$$B_3 = \frac{1}{x_3} \left(\frac{d\bar{x}}{dt} + \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} + \eta_3 \frac{dx_3}{dt} \right)$$

方程(10)为对流扩散方程,对方程(10)进行差分离散,空间域取二阶精度的中心差分,时间域取时间二阶精度的平均隐式差分,经运算,方程(10)的差分离散代数方程组为

$$[A] \{T\} = \{C\} \quad (11)$$

式中, $[A]$ 为三角矩阵; $\{T\}$ 为离散节点温度矢量; $\{C\}$ 为矢量。

矩阵 $[A]$ 的系数为

$$\left. \begin{aligned} a_{j-1,j} &= \frac{(B_i)_j^n \Delta t}{4\Delta\eta_i} - \frac{(A_i)_j^n \Delta t}{2\Delta\eta_i^2} \\ a_{j,j} &= 1 + \frac{(A_i)_j^n \Delta t}{\Delta\eta_i^2} \\ a_{j+1,j} &= \frac{(B_i)_j^n \Delta t}{4\Delta\eta_i} - \frac{(A_i)_j^n \Delta t}{2\Delta\eta_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

矢量 $\{C\}$ 的系数为

$$C_j = \left(-\frac{(B_i)_j^n \Delta t}{4\Delta\eta_i} + \frac{(A_i)_j^n \Delta t}{2\Delta\eta_i^2} \right) (T_i)_{j-1}^n + \left(1 - \frac{(A_i)_j^n \Delta t}{\Delta\eta_i^2} \right) (T_i)_j^n + \left(\frac{(B_i)_j^n \Delta t}{4\Delta\eta_i} + \frac{(A_i)_j^n \Delta t}{2\Delta\eta_i^2} \right) (T_i)_{j+1}^n$$

式中, i 为分层编号; j 为离散节点编号; $\Delta\eta_i = 1/N$ 。

解方程(11)还需添加两个附加条件,其物理意义是 SiO_2 层和空腔层内的质量守恒。

$$\frac{d\bar{x}}{dt} + \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} = \frac{m_{p1}}{\rho_3 - \rho_1} \quad (13)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{m_{p2}}{\rho_3 - \rho_2} \quad (14)$$

间断面边界条件(7)、(8)在动坐标系分别写成

$$\left. \begin{aligned} -\frac{K_1}{x_1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \eta_1} &= -\frac{K_2}{x_2} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \eta_2} + m_{p1} \Delta H_{p1} \\ T_1 &= T_2 = T_a \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{K_2}{x_2} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \eta_2} &= -\frac{K_3}{x_3} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial \eta_3} + m_{p2} \Delta H_{p2} \\ T_2 &= T_3 = T_b \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由方程(15)、(16)确定 m_{p1} 、 m_{p2} 的精度,依赖于温度一次导数的精度。而温度一次导数,在间断面附近,用三点差分计算,精度不易保证,它的直接后果是影响方程(10)中系数 B_i 的计算精度。系数 B_i 的大小,会影响方程(10)的性质。为了克服这一困难,本文直接从基本方程(10)给出间断面前后的温度一次导数。

上述三层模型由于其分层内(特别是空腔层内)热物性参数很难准确确定,给实际应用带来困难。经与多次地面实验结果的分析比较,得出的结论为采用一个简化的分解层模型可以得到与实验相符的结果,为此,采用一个分解层的简化模型。可将图1中的空腔层化为一个分解面,而 SiO_2 层的热物理性能参数考虑了空腔层效应的等效热物理性能参数,公式(11)中的热熔矩阵和热加载矢量可作相应的简化。

4 温度计算与实验结果比较

为了验证物理模型和计算方法,将计算结果与实验结果进行了比较。选用两种低密度材料作为实验模型,模型A和B,每一模型采用两组实验状态。

模型 A_1 、 A_2 厚度: $\delta = 20$ 、 23 mm

模型 B_1 、 B_2 厚度: $\delta = 21$ 、 23 mm

实验状态:

(1)模型 A_1 , $q_{\alpha} = 128$ kW/m², $h_s = 16$ MJ/kg;

(2)模型 A_2 , $q_{\alpha} = 161$ kW/m², $h_s = 17$ MJ/kg;

(3)模型 B_1 同(1);

(4)模型 B_2 , $q_{\alpha} = 169$ kW/m², $h_s = 16$ MJ/kg。

实验加热时间为 $t = 530.0$ s, 实验测量时间为 $t = 1200$ s。

以实验状态参数为条件,采用本文的物理模型和计算方法,计算加热时间与实验加热时间相同。图2所示为模型A材料背面温度随时间变化计算值与实验结果比较;图3为模型B计算值和实验结果比较。

图2(a)、图3(a)为低状态时计算值和实验结果,材料背面温度低;图2(b)、图3(b)为高状态时计算值和实验结果,因此材料背面温度较高。

由以上两种材料在不同加热环境下所得到的材料背面温度计算值与实验结果比较,计算值与实验结果符合较好,认为本文提供的分层物理模型和热响应的计算方法是合理的。

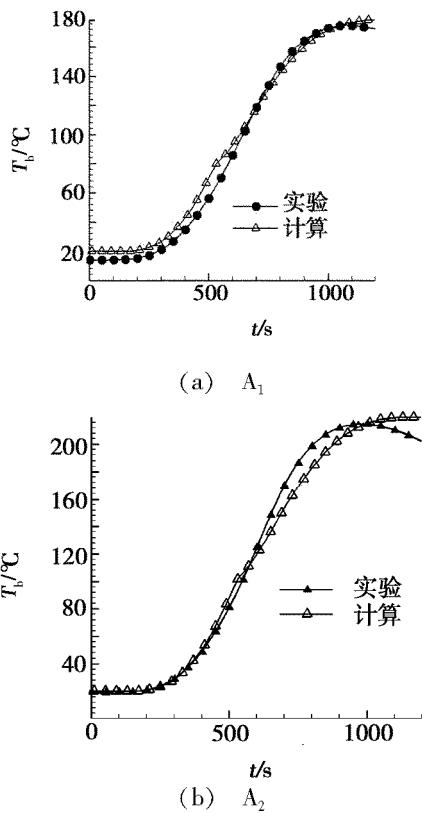


图2 模型 A 背面温度分布计算值与实验结果比较
Fig.2 Result of backside temperature distribution of model A

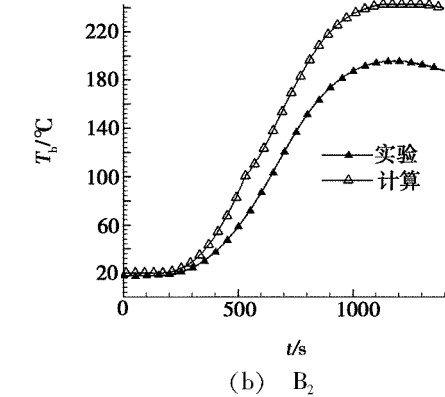
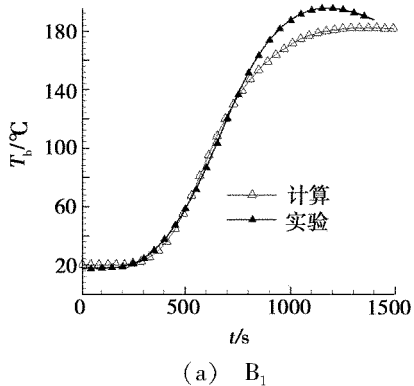


图3 模型 B 背面温度分布计算值与实验结果比较

Fig.3 Result of backside temperature distribution of model B

5 结论

本文给出了低密度材料的防热机理分析及热响应数值模拟方法。在实验热环境条件下计算了两种低密度模型材料温度分布,并与实验结果作了比较,得到了在不同加热环境下模型材料背面温度分布计算值与实验测量结果是一致的,低密度材料的防热机理及热响应数值模拟方法得到了实验结果的验证。

参考文献

- 1 Chamis C C, Hopkins D A. Thermoviscoplastic nonlinear constitutive relationships for structural analysis for high temperature metal matrix composition. NASA TM - 87291, 1985
- 2 Matthews R K, Stepanek S A, Stallings D W. Aero-thermal test methodology for the development of structural components for hypersonic vehicles. AIAA Paper 91 - 1441, 1991
- 3 Pitts W C, Murbach M S. Heat-shield Design for trans-atmospheric vehicles. AIAA, 86 - 1258, 1986
- 4 姜贵庆,毛国良. 返回式卫星和飞船返回舱的再入热环境与防热. 航天空气动力学,北京:宇航出版社,1994:425
- 5 姜贵庆,刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护,北京:国防工业出版社,2003

(编辑 任涛)

2010年《炭素技术》杂志征订启事

《炭素技术》杂志创刊于1982年,是经国家科委和新闻出版署批准的国内外公开发行的炭素专业科技期刊。国内统一刊号CN 22-1147-TQ,国际标准刊号ISSN 1001-3741,广告经营许可证号吉工商广字:220204400009。办刊宗旨是交流技术、传播信息,促进炭素工业及炭材料学科技术进步。主要介绍我国炭素工业及相关行业的生产技术、科学试验、理论研究、经营管理、市场信息,使用设备的开发与更新,产品质量监督、环境保护与综合利用、检测、计算机在炭素生产领域应用等方面的经验成果;报导炭材料学科包括钢铁冶金用炭材料、铝用炭材料、电炭材料、碳纤维及复合材料、活性炭、金刚石及石墨层间化合物、各种新型炭材料、特种炭材料等的新产品、新工艺以及炭材料应用技术研究、有关炭材料领域和炭素工业国外先进技术和发展动态。《炭素技术》设有专家讲座、实验研究、经验交流、综合述评、计算机应用与控制、技术改造、节能环保、行业信息、消息报导、炭素文摘、专利等栏目。

《炭素技术》杂志目前已成为中国科技核心期刊,已加入《中国期刊网》、《中国学术期刊》(光盘版)全文数据库、万方数据系统数字化期刊群、中文科技期刊数据库,同时还被《美国化学文摘》、《俄罗斯化学文摘》等国外情报机构检索;是《CAJ-CD规范》执行优秀期刊。

《炭素技术》的发行面覆盖了全国的炭素厂家、有关的科研院所、大专院校及生产炭素用原料、机械设备等生产单位。

本刊为大16开版本,双月刊,单价15.00元,全年订价90.00元。国内邮发代号:12-308,全国各地邮局均可订阅,也可与编辑部联系补订。本刊承接彩色、黑白广告业务,热忱地为国内外企业服务,宣传产品,推广技术,树立企业形象。

地址:吉林市哈达湾和平街9号《炭素技术》编辑部 邮编:132002

开户行:工商银行吉林市分行哈达湾办事处 户名:中钢集团吉林炭素股份有限公司 帐号:080221060900000171

电话:0432-2749715(传真) 2749271 E-mail: tsjsbjb@126.com