

航天工业部强度环境技术情报网

结构热强度与环境工程技术交流会文集

1983年 苏 州

《强度与环境》编辑部

在上級有關部門的大力支持下，以文匯出版了。本文集共收有關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

為解決材料和結構在受壓、受拉和實驗研究工作，特別是關於材料、結構、設計、試驗技術等幾個側面，總結和彙集了技術水平。這些文章，為

目 录

理论计算方法、程序

复合材料热防护和热结构数值模拟试验	(1)
引言	(1)
一、端头热防护数值模拟试验	(2)
二、再入卫星热防护数值模拟试验	(4)
三、固体发动机喷管热防护数值模拟试验	(6)
四、材料热响应和热结构的数值模拟试验	(8)
五、结束语	(9)
碳基端头烧蚀、温度、热应力计算	(11)
符号说明	(11)
前言	(11)
一、温度计算	(12)
二、烧蚀和外形计算	(12)
三、热应力计算	(13)
四、选形计算	(14)
五、计算实例	(14)
六、初步分析	(16)
轴对称线弹性热结构分析程序及其应用	(18)
一、前言	(18)
二、理论基础简述	(18)
三、程序的组成及其特点	(21)
四、考题验证计算	(22)
五、再入飞行器端头帽热结构分析	(23)
用有限元法计算统槽式推力室的壁温度分布	(25)
一、前言	(25)
二、有限元法变物性二维稳定态热传导方程及程序简介	(25)
三、推力室矩形冷却通道壁温计算结果	(27)
四、计算结果分析	(27)
再入端头热应力计算程序——对 SAAS III 程序的移植和改进	(29)
(摘要)	(29)

四、喷管固体火箭底部加热环境试验研究	(30)
前言	(30)
一、概述	(30)
二、缩比模型与试验装置模拟关系	(31)
三、测量结果与分析	(34)
四、结论	(35)
喷管热振联合试验	(36)
一、前言	(36)
二、试验方法简介	(36)
三、结果	(37)
碳毡C/C防热套热刚度试验技术及分析	(38)
一、问题的提出	(38)
二、技术难点	(38)
三、试验技术	(39)
四、试验结果及可靠性	(40)
五、分析和讨论	(41)
结论	(42)
飞行器弹道上升段的气动加热设计与试验	(43)
引言	(43)
气动加热简述	(43)
气动防热的设计途径	(44)
气动防热的试验方法及分析	(45)
设计、试验中存在的问题及分析	(48)
结束语	(49)
级间防热结构的设计和试验分析	(50)
主要符号	(50)
一、前言	(50)
二、最佳设计方案选择	(50)
三、选择防热材料	(52)
四、防热结构全尺寸耐烧蚀试验	(54)
五、结论	(55)
复杂结构件的加热试验和有效比热计算	(56)
前言	(56)
试验装置	(56)
有效比热值计算	(57)

几点看法	(58)
热流测量及“银板法”热流校验系统误差分析	(60)
一、前言	(60)
二、圆筒式热流计的特性	(60)
三、热流测量及圆筒热流计的应用	(61)
四、“银板法”热流校验装置的原理及标定方法	(62)
五、“银板法”校验系统的误差分析及评价	(65)
关于提高 q 控热试验精度的探讨	(72)
一、前言	(72)
二、热流控制(q 控)热试验误差来源	(72)
三、提高热流控制热试验精度的途径	(75)
四、结束语	(77)
航天器结构热试验中的测量技术	(79)
一、前言	(79)
二、瞬态温度测量技术	(79)
三、高温应变测量技术	(81)
四、结束语	(84)
粘贴式热电偶及其应用	(85)
一、前言	(85)
二、粘贴式热电偶及其安装工艺	(85)
三、应用实例及精度分析	(87)
四、几点看法	(90)
对防热结构的试验方法(摘要)	(90)
模拟热颤振试验研究(摘要)	(91)

控制、测量方法和设备

多变量控制系统的设计方法	(92)
一、设计线性多变量控制系统的根轨迹法	(92)
二、设计多变量系统改进的直接解耦法	(94)
快速测控系统应用软件包的设计	(97)
一、前言	(97)
二、系统的组成原理	(97)
三、软件编制	(97)
四、软件控制器的改进方案	(104)
五、结束语	(104)
两点协调加载方案的一个设想	(105)

一、原理	(105)
二、关于 P_1 与 P_2 的协调	(106)
三、关于液压增量执行元件	(106)
引燃管式功率随动系统及其应用	(107)
前言	(107)
一、碘钨灯负载动态电流的计算	(107)
二、引燃管调功装置的结构	(110)
三、应用实例	(113)
附录	(116)
瞬态气动力加热模拟控制系统中可控硅功率装置的设计及其	
传递函数	(118)
一、概述	(118)
二、单台功率装置的容量和电压	(118)
三、主回路、控制回路及冷却方式	(118)
四、主回路参数计算	(119)
五、控制回路参数计算	(121)
六、可控硅及其功率装置的传递函数	(122)
结构热应力试验中可控硅加热功率的计算和测量(摘要)	(125)

复合材料热防护和热结构数值模拟试验

姜贵庆 王淑华

北京空气动力研究所

【摘要】 随着计算技术的迅速发展,数值模拟试验技术引起人们的广泛重视。本文从数值模拟试验技术的角度,对过去预测复合材料的热防护和热结构性能的研究作一些回顾,指出数值模拟试验技术的优点及其局限性,以供材料设计工程师参考。

引 言

随着计算机技术的迅速发展,一种新的试验技术展现在人们的面前,这就是数值模拟试验技术。1982年6月在华盛顿举行的国际计算方法与实验测量会议,内容就包括了试验结果与分析结果及数值结果的对比,数值模型与试验模型的相互作用,通过数值模型与试验结果描述材料的性能。

热防护复合材料设计工程师希望能对所研制的材料预测其烧蚀性能和热结构性能,以便对材料能否满足热防护设计的要求作出抉择,并为进一步的研制提供改进的信息。已被实践证明的一个有效方法是作地面试验,包括电弧加热器试验,燃气流试验以及各类的静态加热试验。由于加热功率的限制,这种地面试验只能进行局部模拟。对于有限个地面试验的数据,人们只能通过理论预测的方法来判断材料在实际再入加热环境下的烧蚀及其热结构性能。数值模拟试验技术实际是一种理论预测,但是由于高速大容量计算机的问世,使其理论预测能接近实际的可能。材料的物化性能,力学性能的变化对材料热防护性能和热结构的影响,理论预测能给出清晰的结果,这如同作地面试验一样。数值模拟试验的优点是经济、方便且运用范围广,一些地面试验无法模拟的状态,它都能给出预测的结果。当然,它毕竟不是实测的结果,其可信性常使人怀疑,因此为了提高其可信性,必须以一定数量的地面试验作为依据。

本文从数值模拟试验技术的角度,对我们过去在复合材料的热防护和热结构性能预测的研究作一些回顾,目的是使我们所进行的数值模拟研究工作能为复合材料设计工程师提供一些依据,以便使数值模型与试验模型更好地结合起来,为材料的研制提供更多有益的信息。

1985年1月26日收到修改稿。

一、端头热防护数值模拟试验

1. 数值模型

端头再入热环境的特点是高温、高压、高热流，其外表面烧蚀严重。早期的端头热防护材料为硅基复合材料（包括玻璃增强塑料，高硅氧增强塑料和碳-石英），近期为三向 C/C 复合材料。下面分别叙述这两类复合材料的数值模型。

① 硅基复合材料热防护数值模型

参考[1]给出硅基复合材料热防护性能的预测，其主要公式如下：

$$\alpha_{\text{SiO}_2} f_{\text{SiO}_2} = \frac{(1+B_o)(\psi q_{0r}/h_r \dot{m}_w) + \frac{f_s}{2}}{(MP_e/P_v - 1)} \quad (1)$$

$$B_{-} = \frac{(h_r - h_w) + B_o \Delta H_o - \alpha_{\text{SiO}_2} f_{\text{SiO}_2} \Delta H_v - (\epsilon \sigma T_w^4) h_r / \psi q_{0r}}{C_F (T_w - T_o)} \quad (2)$$

$$\text{式中 } B_{-} = \dot{m}_w h_r / \psi q_{0r} \quad (3)$$

$\psi = 1 - 0.58 B_{-}$ ，为层流，

$\psi = 1 - 0.2 B_{-}$ ，为湍流，

ϵ 为材料辐射系数，

B_o 为碳的无因次质量损失率，在计算中对高硅氧 $B_o = f_s/2$ (f_s 为树脂含量)，对 C-石英时， B_o 为碳纤维质量含量。

M 为分子量比值，即空气分子量与 SiO_2 分子量的比值。

P_v 为 SiO_2 的蒸气压， ΔH_o 为碳的燃烧热， ΔH_v 为气化热。

$$V_{-}(1-f) = (2\delta_i^2/\mu_{wi}) \tau_{ws} (1 - 2P_{ss}\delta_i/\tau_{ws}) \quad (4)$$

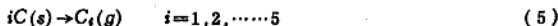
$$\delta_i = \frac{K_i T_w}{n[\psi q_{0r}(1-h_w/h_r) - \alpha_{\text{SiO}_2} f_{\text{SiO}_2} (\psi q_{0r}/h_r) \Delta H_v - m_o \Delta H_o]}$$

式中 $n = 68890/T_w$ ， τ_w 为剪切力， $\tau_{ws} = \frac{\partial \tau_w}{\partial x}$ ， μ_{wi} 为粘性系数， K_i 为液层导热系数。

$$f = f_s/2 + B_o/B_{-} + \alpha_{\text{SiO}_2} f_{\text{SiO}_2}$$

② 碳基复合材料热防护数值模型

假定主要反应为：



参考[2]给出上述反应碳烧蚀率的预测公式及其烧蚀机理的详细说明。其主要公式归纳如下

$$B_w = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^5 C_{oiw} - \frac{M_o}{M_{O_2}} C_{oow} - \frac{M_o}{M_{CN}} C_{onw}} \left(\sum_{i=1}^5 C_{oiw} + \frac{M_o}{M_{O_2}} C_{oow} + \frac{M_o}{M_{CNW}} C_{onw} \right) \quad (10)$$

$$C_{\text{Ow}} = M_{\text{O}} / M_{\text{e}} \cdot \bar{C}_{\text{Oe}} / (1 + B_w) \quad (11)$$

$$C_{\text{ONW}} = \frac{1}{2} \left[-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\beta} \frac{\bar{C}_{\text{Ne}}}{(1+B)} \right] \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{K_{\text{PONW}}^2}{P_e} \cdot \frac{M_N}{M_{\text{ON}}} \cdot \frac{M_{\text{CN}}}{\bar{M} M_{\text{N}_2}} \left(1 + \frac{(K_{\text{PNW}})^{1/2}}{K_{\text{PONW}}} \right) \quad (13)$$

$$\beta = \left(\frac{K_{\text{PONW}}}{P_e} \right) \left(\frac{M_{\text{CN}}}{\bar{M} M_{\text{N}_2}} \right) \quad (14)$$

$$C_{\text{NW}} = \left(\frac{M_N}{M_{\text{ON}}} \right) \left(\frac{K_{\text{PNW}}}{K_{\text{PONW}}} \right) C_{\text{ONW}} \quad (15)$$

$$C_{\text{N}_2\text{W}} = \frac{P_e}{K_{\text{PONW}}} \left(\frac{\bar{M} M_{\text{N}_2}}{M_{\text{CN}}^2} \right) C_{\text{ONW}} \quad (16)$$

$$C_{\text{O}_i\text{W}} = \frac{M_{\text{O}_i}}{\bar{M}} \left(\frac{K_{\text{POiW}}}{P_e} \right) \quad i=1, 2, \dots, 5 \quad (17)$$

$$\bar{M} = \left[\frac{\sum_{i=1}^5 C_i}{M_i} \right]^{-1} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{\text{e}} = f \cdot \dot{m}_w \quad (19)$$

上式中 K_{PNW} 为方程 (7) 的平衡常数,

K_{PONW} 为方程 (8) 的平衡常数,

K_{POiW} 为方程 (9) 的平衡常数,

f 为机械剥蚀因子。

2. 数值模拟试验与电弧加热器试验结果的比较

① 硅基材料

表 1 给出硅基材料的数值模拟试验结果与电弧加热器试验 (简称电加试验) 结果的比较, 在工程误差范围内二者的结果是一致的。

表1 高硅氧材料烧蚀性能数值模拟试验与电加试验结果的比较

状 态	P_i (大气压)	H_i (大卡/公斤)	电 加 结 果 $V_{\text{e}}(\text{毫米/秒})$	数值模拟结果 V_{e} (毫米/秒)
1	1.50	3200	0.67	0.876
2	1.55	5060	0.88	1.130
3	1.55	5600	1.05	1.173
4	5.3	2000	0.79	0.955
5	5.7	2700	1.02	1.094
6	5.5	3500	1.45	1.294
7	16.5	2100	1.80	1.705
8	14.5	3000	2.20	2.027
9	22	2600	2.75	2.452
10	36	1050	2.10	1.872

② 碳基材料

表2给出C-C复合材料的数值模拟试验与电加试验结果的比较,在工程误差范围内二者的结果亦是一致的。

表2 碳基材料烧蚀性能数值模拟试验与电加试验结果的比较

状 态	P 大 气 压	H _i (大卡/公斤)	电 加 结 果 V _电 (毫米/秒)	数值模拟结果 V _数 (毫米/秒)
1	18.7	1646	0.33	0.452
2	28.9	1762	0.799	0.797
3	41.5	1604	1.010	1.236
4	53.7	1393	1.249	1.561
5	6.1	1923	0.21	0.207
6	11.9	1870	0.30	0.306
7	18.2	1664	0.45	0.430
8	30	1459	0.66	0.794
9	44	1431	1.23	1.242
10	61	1139	1.55	1.597
11	74.2	1122	2.08	2.132

二、再入卫星热防护数值模拟试验

1. 数值模型

再入卫星热环境的特点是高温、低热流、长时间,其外表面烧蚀不大,但内部热传导成为热防护设计关注的主要问题,因为过高的内壁温度会使舱内仪器失效,达不到预期的目的。符合这种热环境的材料要具备低密度和高热解率的条件。这类复合材料在加热过程中会出现材料的热解、热解气体的流动及二次裂解等复杂的物理化学过程。参考[3]给出描述这种物理化学过程的数值模拟。简述如下,根据材料在加热过程中材料热物化性能变化的特点,将材料分成四层:即碳层、热解层、原始材料层和隔热层。

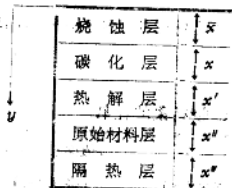


图1 分层示意图

① 碳层温度计算公式

将碳层 x 分成 n 等份, 每份厚度为 x/n

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}(T_i + T_{i+1}) = & \frac{q_i - q_{i+1} - (\dot{m}_i \bar{C}_p + \dot{m}_o C_p)(T_i - T_{i+1})}{\frac{1}{2} \rho C_p \left(\frac{x}{n} \right)} \\
 & - (2i+1)(T_i - T_{i+1}) \frac{1}{x} \frac{dx}{dt} \quad i=0, 1 \dots n-1 \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\dot{m}_0 = \rho \frac{d\bar{x}}{dt} \quad (21)$$

$$q_i = \frac{K(T_{i-1} - T_{i+1})}{2(x/n)} \quad (22)$$

其中 K 为碳化层导热系数。

② 热解层温度计算公式

将热解层 x' 分成 m 等份，每份的厚度为 x'/m

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [(\rho' C_p' T')_j + (\rho' C_p' T')_{j+1}] = & \{(\dot{m}_j - \dot{m}_{j+1}) - [\dot{m}_j (\bar{C}_p T' + \Delta H_F) \\ & - \dot{m}_{j+1} (\bar{C}_p T'_{j+1} + \Delta H_F)]\} / z - [(\rho' C_p' T')_j - (\rho' C_p' T')_{j+1}] \\ & \left(\frac{d\bar{x}}{dt} + \frac{dx}{dt} \right) \} / z - (2j+1) [(\rho' C_p' T')_j - (\rho' C_p' T')_{j+1}] \frac{1}{x'} \frac{dx'}{dt} \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $z = x'/2m$

$j=0, 1, \dots, m-1$, $\dot{m}_j$ 由连续方程决定。

$$\dot{m}_j = \dot{m}_{j+1} - \left(\frac{d\rho'}{dT'} \right) \left[\frac{x'}{2m} \left(\frac{dT'}{dt} + \frac{dT'_{j+1}}{dt} \right) - \left(\frac{j+1}{m} T_{j+1} + \frac{j}{m} T_j \right) \frac{dx'}{dt} \right] \quad (24)$$

$j=0, \dots, m-1$, $\dot{m}_0 = \dot{m}_F$

③ 原始材料层温度计算公式

将原始材料层 x'' 分成 s 等份，每份的厚度为 x''/s

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (T_k'' + T_{k+1}'') = & \frac{q_k'' - q_{k+1}''}{1/2 \rho'' C_p'' (x''/s)} - (2s - 2K - 1) 1 - x'' \times \\ & \times \frac{d(\bar{x} + x + x')}{dt} (T_k'' + T_{k+1}'') \end{aligned} \quad (25)$$

$K=0, 1, \dots, s-1$

④ 隔热材料层温度计算公式

将隔热材料层 x'' 分成 z 等份，每份的厚度为 x''/z

$$\frac{d}{dt} (T_l'' + T_{l+1}'') = \frac{q_l'' - q_{l+1}''}{1/2 \rho'' C_p'' (x''/z)} \quad l=0, 1, \dots, z-1 \quad (26)$$

上述公式中 q_l' 、 q_k'' 、 q_l'' 分别由下式确定：

$$q_j = K' \frac{T_j' - 1 - T_{j+1}'}{2 \left(\frac{x'}{m} \right)} \quad (27)$$

$$q_k'' = K'' \frac{T_k'' - 1 - T_{k+1}''}{2 \left(\frac{x''}{s} \right)} \quad (28)$$

$$q_i^* = K'' \frac{T_{i-1}^* - T_{i+1}^*}{2 \left(\frac{x''}{z} \right)} \quad (29)$$

其中 K' 为热解层导热系数, K'' 为原始材料层导热系数, K^* 为隔热层导热系数。

以下给出初始条件和边界条件:

初始条件: $t=0 \quad T(x, 0) = 300K$

表面条件: $y=\bar{x} \quad -K \frac{\partial T}{\partial y} = \psi q_0 \left(1 - \frac{h_w}{h_r} \right) - \epsilon \sigma T_w^4 + \dot{m}_o \Delta H_o$

交界面条件: $y=\bar{x}+x \quad T_n = T_o^* \quad q_n = q_o^*$

$y=\bar{x}+x+x' \quad T_o^* = T_o^* \quad q_o^* = q_o^*$

$y=\bar{x}+x+x'+x'' \quad T_o^* = T_o^* \quad q_o^* = q_o^*$

背面条件: $y=\bar{x}+x+x'+x''+x''' \quad q_s = 0$

补充关系式:

$$\psi = 1 - 0.724(\dot{m}_o + \dot{m}_r) \frac{h_r}{q_o} + 0.13(\dot{m}_o + \dot{m}_r) \frac{2h_r^2}{q_o^2} \quad (30)$$

$$\dot{m}_o = \frac{\frac{\bar{C}_{oxo}}{(1+B)}}{\frac{1}{\bar{\alpha}_{ox}} + \frac{1}{\alpha_{d1}}} \quad T_w < 1700K \quad (31)$$

$$\dot{m}_o = \frac{0.1725\psi q_o}{h_r} \quad T_w > 1700K \quad (32)$$

$$\alpha_{d1} = \frac{M_o}{M_o} (1+B) \psi q_o / h_r \quad (33)$$

$$\bar{\alpha}_{ox} = \frac{\alpha_{ox} (1+B)^{1/2}}{(\bar{C}_{oxo} - M_o/M_o B_o)^{1/2}} \quad (34)$$

$$\alpha_{ox} = K_o e^{-E/RT_w} \left(\frac{\bar{M}}{M_{ox}} P_e \right)^{1/2} \quad (35)$$

$$B = B_o + B_r \quad (36)$$

$$B_o = \frac{\dot{m}_o}{\frac{\psi q_o}{h_r}} \quad B_r = \frac{\dot{m}_r}{\frac{\psi q_o}{h_r}} \quad (37)$$

2. 数值模拟试验与电弧加热器试验结果比较

表3给出电弧加热器的状态参数, 表4给出了电加试验结果与数值模拟结果的比较。

表中 t 为加热时间, x_o^* 为试验模型厚度。由表看出, 电加试验与数值模拟试验结果是一致的。

三、固体发动机喷管热防护数值模拟试验

数值模型: 固体发动机喷管热环境的特点是低焓、中等热流, 它的烧蚀量较再入卫星大

表3 试验状态参数

状态	h_s (大卡/公斤)	q_0 (大卡/米 ² ·秒)	P (大气压)	t (秒)	x''_{00} (毫米)
1	3900	210	0.87	72	15
2	4500	594	0.25	67	25
3	4200	290	0.74	48	15
4	2400	330	1.0	120	25

表4 电加试验与数值模拟试验结果比较

状态	电加试验结果			数值模拟结果		
	$\Delta T_0, K$	$\Delta T_1, K$	$\Delta T_2, K$	$\Delta T_0, K$	$\Delta T_1, K$	$\Delta T_2, K$
1	6~12	86~99	96~103	1.2	97.4	112.7
2	0~2	7.5~1.2	22.5~25	0	9.7	31.4
3	0	67~75	80~90	0	66.2	84
4	1	26~34	48~65	0.1	36.9	69.1

一些,但与再入端头相比却小得多。理论与实践皆证明:碳基材料是一种理想的喷管热防护材料。

参考[4]给出三种热防护材料(C/C, C/酚醛和高硅氧)在喷管热环境下烧蚀量预测方法。对于碳基材料的预测方法为碳与燃气的反应:



动力学研究表明,化学反应式(38)和式(39)具有相似的性质,可以认为具有相同的反应级数和相同的动力导参数。碳的质量损失率为:

$$B_{w_1} = \frac{\dot{m}_{w_1}}{\frac{\psi q_{0r}}{h_r}} = \frac{1}{1 + K_1 Pe \frac{\bar{M}}{M_{CO_2} \left(\frac{\psi q_{0r}}{h_r} \right) (1 + B_w)}} \times \left[K_1 Pe \left(\frac{M_0 \bar{M}}{M_{CO_2}^2} \right) \frac{C_{CO_2}}{\left(\frac{\psi q_{0r}}{h_r} \right) (1 + B_w)} \right] \quad (40)$$

$$B_{w_1} = \frac{\dot{m}_{w_1}}{\left(\frac{\psi q_{0r}}{h_r} \right)} = \frac{\frac{K_1 Pe M_0 \bar{M} C_{H_2O}}{M_{H_2O}^2 \left(\frac{\psi q_{0r}}{h_r} \right) (1 + B_w)}}{1 + K_1 Pe \frac{\bar{M}}{M_{CO_2} \left(\frac{\psi q_{0r}}{h_r} \right) (1 + B_w)}} \quad (41)$$

$$B_w = B_{w_1} + B_{w_2} = \frac{\dot{m}_w}{\left(\frac{\psi q_{0r}}{h_r} \right)} \quad (42)$$

式中 $\dot{m}_w$ 为碳总质量损失率, $\dot{m}_{w_1}$ 为 CO_2 所消耗的碳质量损失率, $\dot{m}_{w_2}$ 为 H_2O 所消耗的碳质量损失率。

$$K_1 = K'_0 e^{-E_0/RT} \quad (43)$$

K' 为频率因子, E' 为活化能, C_{CO_2} 和 C_{H_2O} 分别为燃气中 CO_2 和 H_2O 的质量浓度。

$$\psi = 1 - \frac{0.2\dot{m}_w h_r}{q_{or}} \quad (44)$$

表5 数值模拟试验与地面点火试验结果比较

序 号	试验状态		数值模拟结果			点 火 试 验 结 果		
	P (大气压)	T_0 (K)	t (秒)	s (毫米)	m	t (秒)	s (毫米)	m
1	50	3445	70	2.41	0.084	69.224	2.24	0.032
2			65	2.519	0.03875	65	2.5~2.8	0.0385~0.043

由表5给出的数据看出, 两者结果是符合的。

四、材料热响应和热结构的数值模拟试验

1. 数值模型

碳基材料由于导热系数大, 材料内部温度上升较快, 伴随的热应变和热应力亦不能忽视, 并在某些条件下还会出现热裂的现象。参考[5]用统一的数学模式给出碳基材料内部热响应、热应变和热应力的预测方法, 主要公式为:

温度计算公式:

$$\frac{dT}{dt} = - \left\{ \sum_{K=1}^n \left[K_r \frac{(r_i + r_j + r_m)(C_i T_i + C_j T_j + C_m T_m)}{6A_{ik}} + K_2 \frac{(r_i + r_j + r_m)(b_i T_i + b_j T_j + b_m T_m)}{6A_{ik}} \right] \right\} \Omega_{ik} / \sum_{K=1}^n \left[\rho C_p \frac{(2r_i + r_j + r_m)}{12} \right] \Omega_{ik} \quad (45)$$

位移计算公式:

$$\begin{aligned} & - \sum_{K=1}^n \left[\frac{C_i(r_i + r_j + r_m)}{6} \right] \Omega_{ik} \left[\frac{D_{11}(C_i V_i + C_j V_j + C_m V_m)}{2A_{ik}} + \frac{D_{12}(b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m)}{2A_{ik}} \right] \Omega_{ik} \\ & - \sum_{K=1}^n \left[\frac{D_{31}(C_i V_i + C_j V_j + C_m V_m)}{6A_{ik}} + \frac{D_{32}(b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m)}{6A_{ik}} \right] \Omega_{ik} A_{ik} \\ & - \sum_{K=1}^n D_{33} \left[\frac{V_i}{r_i} + \frac{3(V_i + V_j)}{2(r_i + r_j)} + \frac{3(V_i + V_m)}{2(r_i + r_j)} \right] \Omega_{ik} \\ & \times \frac{A_{ik}}{12} + \sum_{K=1}^n \left[\frac{C_i(r_i + r_j + r_m)}{6} \right] \Omega_{ik} [(D_{11}a_r + D_{12}a_z + D_{13}a_r(Te - T_0))] \Omega_{ik} \\ & + \sum_{K=1}^n [(D_{31}a_r + D_{32}a_z + D_{33}a_r)(Te - T_0)] \Omega_{ik} \frac{A_{ik}}{3} = 0 \quad (46) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{K=1}^n \left[\frac{C_i(r_i + r_j + r_m)}{6} \right]_{\Omega_{iK}} \left[\frac{D_{44}(C_i u_i + C_j u_j + C_m u_m)}{2A_{iK}} + \frac{D_{44}(b_i V_i + b_j V_j + b_m V_m)}{2A_{iK}} \right]_{\Omega_{iK}} \\
& - \sum_{K=1}^n \left[\frac{b_i(r_i + r_j + r_m)}{6} \right]_{\Omega_{iK}} \left[\frac{D_{12}(C_i V_i + C_j V_j + C_m V_m)}{2A_{iK}} \right. \\
& \left. + \frac{D_{22}(b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m)}{2A_{iK}} - (D_{11}\alpha_r + D_{12}\alpha_z + D_{13}\alpha_r)(Te - T_0) \right]_{\Omega_{iK}} \\
& - \sum_{K=1}^n \left[\frac{D_{22}b_i(r_i + r_j + r_m)}{6} \right]_{\Omega_{iK}} = 0 \quad (47)
\end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ r_{rz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{v}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (48)$$

应力计算公式:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\} \quad (49)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, r_{rz}\}^T \quad (50)$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \bar{r}_{rz}\}^T \quad (51)$$

$$\{\varepsilon_0\} = \{\alpha_r(Te - T_0), \alpha_z(Te - T_0), \alpha_r(Te - T_0), 0\}^T \quad (52)$$

上式中一些符号的物理含意请参考[5], 这里不再细述。

2. 数值模拟试验与电加试验结果的比较

参考[6]给出热响应数值模拟试验与电加试验结果的比较。表6, 7分别给出其中的部分结果。

由表6和表7可以看出, 数值模拟结果与电弧加热器试验结果是很接近的。关于应变, 目前还没有得到地面试验结果, 因此没有给出数值模拟与地面试验结果的比较, 但参考[5]已指示, 数值模拟与解析解结果是一致的。

五、结 束 语

数值模拟试验已在空气动力学和流体力学领域得到广泛的应用, 如何将此试验手段应用于复合材料的研制, 本文仅在复合材料的热防护性能方面作了一些探索。真正应用于复合材料的领域还需要作大量的工作。此文目的是为了引起重视, 以便充分利用计算机领域的最新成果为复合材料的研制服务。

表6 石墨半球对称轴节点数值模拟
与电加试验结果比较

流 场 参 数	加 热 时 间 (t 秒)	数 值 模 拟 (ΔT_K)	电 加 试 验 (ΔT_K)
$h_s=4000$ 大卡/公斤	3	596.5	600.0
	5	760.0	750.0
$q_{0s}=1160$ 大卡/米 ² ·秒	7	909.0	850.0
	9	1048.8	980.0
$P=0.8$ 大气压	11	1177.9	1110
	13	1300.1	1225
	15	1415.1	1340

表7 石墨半球45°射线节点数值模拟
与电加结果比较

流 场 参 数	加 热 时 间 (t 秒)	数 值 模 拟 (ΔT_K)	电 加 试 验 (ΔT_K)
$h_s=4000$ 大卡/公斤	3	549	550
	5	697.8	700
$q_{0s}=1160$ 大卡/米 ² ·秒	7	832.3	840
	9	962.7	960
$P=0.8$ 大气压	11	1081.8	1070
	13	1196.6	1180
	15	1306.8	1310

参 考 文 献

- [1] 姜贵庆:《硅基热防护材料热化学烧蚀分析》, 北京空气动力研究所技术报告, 1980.
- [2] 姜贵庆:《碳基材料烧蚀外形计算》, 北京空气动力研究所技术报告, 1978.
- [3] 姜贵庆:《有加质和化学反应热传导的积分计算》, 宇航学报 1980 No1 或 AIAA paper 79-1056.
- [4] 姜贵庆, 吴宁生:《喷管烧蚀型面的计算》, 北京空气动力研究所技术报告, 1980.
- [5] 姜贵庆:《加权余数有限元在热结构计算中的应用》, 北京空气动力研究所技术报告, 1981.
- [6] 姜贵庆, 王淑华:《加权余数有限元用于端头热响应计算的初步试验验证》, 北京空气动力研究所技术报告, 1983.

碳基端头烧蚀、温度、热应力计算

刘 连 元

航天工业部一院十四所

符 号 说 明

符 号	单 位	意 义	符 号	单 位	意 义
K	大卡/米·秒·度	导热系数	R_N	米	端头钝度
T	K	温 度	L	米	端头长度
ρ	公斤/米 ³	密 度	Lx_1	米	端头外伸长度
c_p	大卡/公斤	比 热	β	度	端头半锥角
α	大卡/米 ² ·度	换热系数	N		节点数
q	大卡/米 ² ·秒	热 流	E	公斤/厘米 ²	弹性模量
t	秒	时 间	ν		波桑比
θ		权 系 数	v	米/秒	烧蚀速度
k_p		反应常数	下标:		
C		碳	r		径向
N_2		氮 气	z		轴向
M		分子量(原子量)	0		初始值
H	大卡/公斤	焓	ω		表面
σ		波尔兹曼常数	s		当地位置
e		相对黑度	r_0		恢复
ΔQ	大卡/公斤	反 应 热	c_v		汽化
α_r	1/K	径向膨胀系数			

前 言

随着导弹技术的发展和弹头的小型化,自七十年代以来碳基端头获得了迅速的发展。碳基端头烧蚀率低,在解决弹头烧蚀量小,外形变化小等方面远远超过了硅基端头,是目前解决再入高精度及滚转异常的比较理想和现实的端头防热方案。但是,由于碳基端头导热率高,在再入期间的高热流作用下表面温度高达4000K左右,造成端头内部很大的温度梯度,形成很大的热应力,成为使用的障碍和关键,国外在材料研究、设计方法^[1,2]和试验技术上进行了大量的研究。随着研究工作的进展,碳基端头的使用变成了现实。美国七十年代末到

1985年3月15日收到修改稿。