

TYC-1 涂层材料热防护性能预测^{*}

姜贵庆

(北京空气动力研究所 北京 100074)

马淑雅

(航天科工集团公司第四设计部 北京 100854)

文 摘 根据 TYC-1 涂层材料在加热过程中所出现的物理化学变化,提出了三层物理模型,建立了相应的守恒方程和边界条件,并给出具有空间和时间二阶精度的差分离散公式,并按稳态和轨道模拟二类试验工况,预测了 TYC-1 耐热涂层的内部温度分布,且与测量结果符合很好。

关键词 TYC-1 涂层,热防护,性能预测

Performance Estimation of Thermal Protection for TYC-1 Coating Material

Jiang Guiqing

(Beijing Research Institute of Aerodynamics Beijing 100074)

Ma Shuya

(The Fourth System Design Department of CASIC Beijing 100854)

Abstract According to the physical-chemical variation due to aeroheating for TYC-1 coating material, a three-layer physical module was presented, in which conservation equation and boundary conditions were established and differential discrete equations with second order accuracy were given. Inner temperature distribution for TYC-1 coating material in stability and trajectory ARC tests condition were predicted. Calculated results agreed with the measurement results.

Key words TYC-1 coating, Thermal protection, Performance estimation

1 引言

TYC-1 耐热涂层材料是一种在气动加热过程中,具有抗烧蚀、隔热和结构三种性能的新型材料。耐热涂料的热响应性能预测是个难度很大的题目,这是由于耐热涂料是一个薄层结构,在加热过程中,涂料本身要发生一系列物理化学变化,而这种物理化学变化的结果要求涂层具有三种功能:在外层应具有良好的抗烧蚀氧化功能,中间层应具有良好的隔热功能,而内层则应具有良好的结构功能。由于涂层(厚度约为 2 mm ~ 3 mm),要建立不同区域反映

不同功能的守恒方程,难度极大;此外不同功能区的材料热物化性能已不同于常温的物化性能参数,如果用一元经典热传导方程与常温的材料物性参数,计算耐热涂层的背面温升,会比电弧加热器的试验结果高好几倍,这说明耐热涂层在加热过程中,已发生了一系列物理化学变化,这些物理化学变化有利于提高涂层材料的耐热性能。

本文提出了一个耐热涂料的分层模型,由于分层模型的物性参数目前还无法给出,故作了一些近似处理,给出的估算方法与稳态和轨道试验状态的

收稿日期:2001-09-10;修回日期:2001-11-08

*国家自然科学基金项目:10 072 056

姜贵庆,1934 年出生,研究员,主要从事气动热力学与热防护的研究工作

测量结果符合较好。

2 TYC—1 防热涂层热防护机理分析

战术弹的大面积热防护由于热环境特性以及质轻、薄层的要求,一般皆采用耐烧蚀消融型和耐烧蚀隔热型的防热涂料材料,它的主要成分为耐高温有机树脂体系,加入改性的其他成分,配以适当的无机填料。

有机树脂一般在 473 K~873 K 之间,会出现热解反应,放出热解气体,温度再升高,有机树脂热解结束,剩留产物与无机填料组成较为坚实的多孔介质层,此层通常称为碳化层,碳化层表面与气体中氧接触会发生氧化反应。当表面温度大于 1700 K,表面材料的 SiO₂ 会熔融,由于其高粘性,不易吹掉,从而起着良好的隔热作用。

图 1 给出 TYC—1 涂层热防护分层模型示意图^[1]。

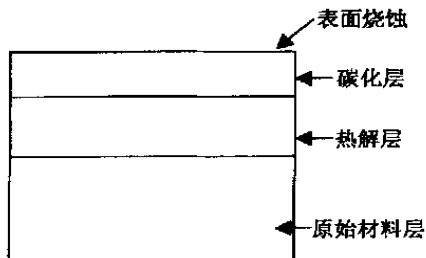


图 1 防热涂层分层示意图

Fig. 1 Sketch of lamination of thermal protection coating material

涂层表面为烧蚀区(包括氧化反应和 SiO₂ 熔融),最接近表面的区域为碳化层,其物理化学变化为:(1)气动热(对流加热和辐射加热);(2)热阻塞(热解气体流过碳化层,进入边界层的吸热效应);(3)热解气体流过碳化层的热焓吸热;(4)热传导。碳化层与原始材料之间的中间区域为热解层,其物理化学变化为:a.材料热解吸热;b.热解气体流过热解层的热焓吸热;c.传导。原始材料层是材料未发生热解的区域,其物理变化为:传导;热焓吸热。

3 TYC—1 涂层热性能控制方程与边界条件

根据上节的分析,涂层防热材料内部温度变化的控制方程可写成如下的形式。

碳化层

$${}_1 C_{P1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \dot{m}_{P1} C_P \frac{\partial T_1}{\partial y}$$

宇航材料工艺 2002 年 第 1 期

$$\bar{x} \leq y < \bar{x} + x_1 \quad (1)$$

热解层

$${}_2 C_{P2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = K_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \dot{m}_{P2} C_P \frac{\partial T_2}{\partial y} + \dot{m}_{P2} H_P$$

$$\bar{x}_1 + x \leq y < \bar{x} + x_1 + x_2 \quad (2)$$

原始材料层

$${}_3 C_{P3} \frac{\partial T_3}{\partial t} = K_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2}$$

$$\bar{x} + x_1 + x_2 \leq y \leq x_{30} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: T 表示材料温度; t 表示时间; x 表示材料厚度; \bar{x} 表示表面烧蚀后退量; x_{30} 表示材料初始厚度; ρ 表示材料密度; C_P 表示材料比热容; K 表示材料热导率; \dot{m}_P 表示热解气体质量损失率; H_P 表示分解热(下标 1、2、3 分别表示碳化层、热解层和原始材料层的物理量)。

初始条件

$$t = 0 \quad T_i(y) = T_0$$

T_0 为初始温度 $i = 1, 2, 3$

边界条件

$$y = \bar{x}$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial y} = q_{or} \left(1 - \frac{h_w}{h_r} \right) - T_w^4 + \dot{m}_C H_C \quad (4)$$

$$y = \bar{x} + x_1, T_1 = T_2$$

$$-K_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = -K_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}$$

$$y = \bar{x} + x_1 + x_2, T_2 = T_3$$

$$-K_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = -K_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}$$

$$y = \bar{x} + x_1 + x_3$$

$$-K_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = 0$$

(4) 式中, $\beta = 1 - a(\dot{m}_P + \dot{m}_C) h_r / q_{or}$

其中, β 表示热阻塞因子; h_r 表示恢复焓; q_{or} 表示冷壁热流; h_w 表示壁焓; $a = 0.58$ 为层流; $a = 0.20$ 为湍流。

$$\dot{m}_C = K_0 e^{-E/RT_w} \left[\frac{\bar{M}}{M_{O2}} Pe \right]^{1/2}$$

\dot{m}_C 表示碳质量损失率

$$K_0 = 0.685 \times 10^3 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{1/2}$$

其中: K_0 表示频率因子;

$$E/R = 21.3 \times 10^3 \text{ K};$$

E 表示活化能, R 表示气体常数;

$$M = 29; M_{O_2} = 32。$$

4 数值解法

方程(1)、(2)、(3)可用差分数值解,先将方程

(1)、(2)、(3)化成标准形式:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = A_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} + B_i \frac{\partial T_i}{\partial y_i} \quad (5)$$

$i = 1, 2, 3$

上式中

$$A_1 = \frac{K_1}{c C_{P1} x_1^2}$$

$$B_1 = \frac{1}{x_1} \left[\left(\frac{d\bar{x}}{dt} + \frac{dx_1}{dt} \right) + \dot{m}_{P1} \frac{\bar{C}_P}{C_{P1}} \right]$$

$$A_2 = \frac{K_2}{\left[\frac{2}{C_{P2}} - \frac{d}{dt} \frac{2}{H_P} \right] x_2^2}$$

$$B_2 = \frac{\left[\left(\frac{d\bar{x}}{dt} + \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} \right) + \dot{m}_{P2} \bar{C}_P \right]}{x_2}$$

$$A_3 = \frac{K_3}{3 C_{P3} x_3^2}$$

$$B_3 = \frac{1}{x_3} \left[\frac{d\bar{x}}{dt} + \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} + \frac{dx_3}{dt} \right]$$

$$1 = \frac{y - \bar{x}}{x_1}$$

$$2 = \frac{y - \bar{x} - x_1}{x_2}$$

$$3 = \frac{y - \bar{x} - x_1 - x_2}{x_3}$$

公式(5)的差分离散方法为:在空间域,采用具有二阶精度的离散公式;在时间域,采用具有二阶精度的平均隐式差分公式。

$$T_i^{n+1} - T_i^n = \frac{t}{2} \left[\left(A_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial^2} + B_i \frac{\partial T_i}{\partial} \right)^{n+1} + \left(A_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial^2} + B_i \frac{\partial T_i}{\partial} \right)^n \right] \quad (6)$$

经运算,可得标准形式基本方程的差分离散公式为

$$\left[\frac{(B_i)_j^{n+1} t}{4 i} - \frac{(A_i)_j^{n+1} t}{2 i^2} \right] (T_i)_{j-1}^{n+1} + \left[1 + \frac{(A_i)_j^{n+1} t}{i^2} \right] (T_i)_j^{n+1} - \left[\frac{(B_i)_j^{n+1} t}{4 i} - \frac{(A_i)_j^{n+1} t}{2 i^2} \right] \times$$

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

$$j = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (7)$$

$j = 0$ 时

$$\left[1 + \frac{5(A_i)_0^{n+1} t}{8 i^2} \right] (T_i)_0^{n+1} - \frac{(A_i)_0^{n+1} t}{2 i^2} (T_i)_1^{n+1} - \frac{(A_i)_0^{n+1} t}{8 i^2} (T_i)_2^{n+1} = (T_i)_0^n + \frac{1}{2} \left[2(B_i)_0^n t + 3(A_i)_0^n t \right] \left(\frac{\partial T}{\partial i} \right)_0^n - \frac{5(A_i)_0^2 t}{8 i^2} (T_i)_0^n + \frac{(A_i)_0^n t}{2 i^2} (T_i)_1^n + \frac{(A_i)_0^n t}{8 i^2} (T_i)_2^n \quad (8)$$

$j = N$ 时

$$-\frac{(A_i)_N^{n+1} t}{8 i^2} (T_i)_{N-2}^{n+1} - \frac{(A_i)_N^{n+1} t}{2 i^2} (T_i)_{N-1}^{n+1} + \left[1 + \frac{5(A_i)_N^{n+1} t}{8 i^2} \right] (T_i)_N^{n+1}$$

$$= (T_i)_N^n + \frac{(A_i)_N^n t}{8 i^2} (T_i)_{N-2}^n + \frac{(A_i)_N^n t}{2 i^2} (T_i)_{N-1}^n - \frac{5(A_i)_N^n t}{8 i^2} (T_i)_N^n \quad (9)$$

5 计算结果与测量结果的比较

5.1 地面试验状态参数

(1) 固定热流的烧蚀试验状态

总焓 $H_S = 1\ 630\ \text{kJ/kg}$;

总压 $P_S = 2.76\ \text{MPa}$;

冷壁热流 $q_{or} = 292\ \text{kW/m}^2$;

实验时间 $t = 100\ \text{s}$ 。

(2) 轨道变热流的烧蚀试验状态

表 1 给出轨道的状态参数。

表 1 轨道的状态参数

Tab. 1 Station parameters of trajectory

状态	t/s	$q_{or}/\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	$H_S/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$T_c/$
1	10	460	934	600
2	7	686	1 172	1 150
3	5	1 168	1 415	1 265
4	5	686	1 151	1 100
5	26	456	879	560

5.2 计算结果与实验结果的比较

TYC—1 涂层材料的常温性能参数为:

热导率 $K = 0.165 \times 10^{-3}\ \text{kW/m}\cdot\text{K}$;

比热容 $C_p = 1.08\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$;

密度 $= 846\ \text{kg/m}^3$ 。

材料热解区的性能参数为:

热导率 $K = 0.4168 \times 10^{-5}\ \text{kW/m}\cdot\text{K}$;

比热容 $C_p = 0.8317\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$;

密度 $= 370\ \text{kg/m}^3$ 。

表 2 给出了固定热流工况和轨道热流工况,不同厚度涂料的最高温度测量结果与计算结果的比较。

表 2 地面试验结果与计算结果的比较*

Tab. 2 Comparison between ground test results and computing results

试验状态	l_1/mm	l_2/mm	$T_{b(\max)}/$	
			测量	计算
固定状态	2.37	3.92	279	274
	2.05	3.94	376	368
轨道	2.28	3.94	85	102
	2.36	3.92	92	-
	2.18	3.90	134	119.94

* l_1 为涂层原始厚度; l_2 为底材厚度。

表 2 中的测量结果表明:

(1) 相同涂层厚度,相同的总加热量,轨道热流工况的材料最高背面温度低于固定热流工况。其原因为:一是固定热流状态的总焓高于轨道热流工况,因而进入材料内部净热流就比较大;二是材料背面温度不仅与加热的环境参数(如热流、总焓)有关。还与加热时间有关,固定热流工况加热时间为 100 s,而轨道热流工况的加热时间为 53 s,因而固定热流工况的背面温度会比轨道热流工况大;

(2) 无论对固定热流工况还是轨道热流工况,本文的计算结果与实验结果是相符的,表明本文提出的三层物理模型是正确的。

6 结论

(1) 本文在分析 TYC—1 涂层材料热防护机理的基础上,提出了分层的物理模型,并建立相应的控制方程和边界条件。

(2) 利用本文提供的方法计算了 TYC—1 涂层在固定热流工况和轨道热流工况,不同厚度涂料的内部温度分布,并与测量结果作了比较,比较结果表明:计算值与测量值符合很好。

参考文献

1 姜贵庆,李鸿权,王淑华. 碳酚醛烧蚀和热响应的理论分析与工程计算. 空气动力学学报, 1989;7(3):364~369

(编辑 马晓艳)