

文章编号:1000-8055(2012)05-1172-07

炭化层疏松/致密结构的三元乙丙烧蚀模型

杨 颀¹, 何国强¹, 李 江¹, 李 强¹, 孙翔宇², 胡淑芳²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院

燃烧、流动和热结构国家级重点实验室, 西安 710072;

2. 中国航天科工集团 第六研究院, 呼和浩特 010000)

摘 要: 分析了烧蚀发动机和高过载烧蚀发动机实验得到 EPDM(三元乙丙)的炭化层结构, 获得烧蚀过程炭化层结构形成变化的机理, 建立了考虑疏松致密结构的多孔炭化层物理模型. 模型中炭化层为非均质的多孔可渗透介质, 孔隙内部存在气体扩散和热化学反应; 炭化层中热解气体沉积效应形成致密结构. 在多孔介质流动与传热算法基础上建立了模拟绝热材料烧蚀过程的数值方法, 计算得到的炭化率、质量烧蚀率和炭化层的多孔结构与实验结果相吻合, 证明了本烧蚀模型能够准确地描述绝热材料的热化学烧蚀过程, 并为耦合烧蚀模型的建立提供数值算法基础.

关 键 词: 三元乙丙; 疏松/致密炭化层; 体烧蚀; 烧蚀模型; 固体火箭发动机

中图分类号: V435⁺. 14

文献标志码: A

EPDM ablation model considering of porous/compact structure of charring layer

YANG Sa¹, HE Guo-qiang¹, LI Jiang¹, LI Qiang¹,
SUN Xiang-yu², HU Shu-fang²(1. National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-Structure,
School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, China;2. The Sixth Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation,
Hohhot 010000, China)

Abstract: By analyzing the characteristics of charring layers obtained in ablation motor and simulating erosion motor, the forming and consumption mechanisms of charring layer were analyzed, and ablation model considering the porosity of charring layer was developed. With the model, the charring layer was described as gas-saturated porous media with dense layer and porous layer, thermo-chemical reaction and gas diffusion existed in the pores of charring layer, and the compact structure of charring layer was formed by sediment of decomposition gas. Based on numerical investigation on flow and convection in porous media, a numerical model was presented to simulate the ablation process, and the calculated ablative rates, mass loss rates and the structures of charring layer agree with experimental results. The ablation model has been proved to simulate the process of the thermo-chemical ablation reasonably, and to provide the numerical method for all ablation models considering the

收稿日期: 2011-06-07; **网络出版地址:** www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.1172_030.html

基金项目: 国家自然科学基金(E060405); 国家重点基础研究发展计划(61371)

作者简介: 杨颀(1984—), 女, 陕西西安人, 博士生, 研究方向为航空宇航推进理论与工程.

thermo-chemical ablation and mechanical erosion.

Key words: EPDM(ethylene-propylene-diene monomer);
porous/compact charring layer; volumetric ablation;
ablation model; solid rocket motor

三元乙丙(EPDM)为炭化类绝热材料,因其烧蚀性能优异,被广泛应用于固体火箭发动机燃烧室的热防护材料.关于 EPDM 绝热材料烧蚀机理的研究和建模对指导其配方研制和发动机热结构设计有着重要的指导意义.

烧蚀过程中 EPDM 等炭化材料的烧蚀表面形成一层疏松的炭化层,热化学反应、高速气流和粒子的机械冲刷作用都体现在对炭化层的消耗,所以炭化层是防热和抵御粒子侵蚀、气流剥蚀的重要屏障.早期非炭化类绝热材料的烧蚀模型不能描述这一复杂过程,因而研究者开始针对炭化类绝热材料的烧蚀机理进行研究.文献[1]根据表面能量守恒和热化学反应建立了一维包覆层热化学烧蚀的计算模型并得到了实验验证.由于含金属高能推进剂的广泛应用,绝热材料烧蚀过程为热化学烧蚀与粒子侵蚀的耦合烧蚀过程,文献[2]和文献[3]分析了酚醛树脂等炭化类绝热材料的耦合烧蚀过程,在热化学烧蚀模型的基础上考虑粒子碰撞的热效应,建立了考虑热化学反应及颗粒冲刷作用的烧蚀模型;文献[4]建立了 EPDM 耦合烧蚀模型,粒子侵蚀作用根据经验公式对热化学烧蚀模型进行修正.随着对炭化类绝热材料烧蚀过程认识的逐渐深入,对于热化学烧蚀过程有了更合理的描述;文献[5-6]的热化学烧蚀模型都提出了热化学反应在炭化层内部进行.目前的烧蚀模型大多延续了非炭化类烧蚀模型中对炭化层的均一化定义,没有对烧蚀过程这一核心结构进行研究.耦合烧蚀模型多在热化学烧蚀模型的基础上通过实验结果修正获得,尚没有较好的建模方法实现热化学烧蚀与气流剥蚀粒子侵蚀的有机耦合.

本文以建立耦合烧蚀模型为出发点,分析典型 EPDM 材料在不同实验条件得到炭化层的特性,确定炭化层生成消耗过程的物理过程,建立能准确描述炭化层性能的烧蚀模型,为耦合烧蚀模型提供基础.

1 实验试件分析

不同烧蚀实验条件下 EPDM 绝热材料的炭

化层结构如图 1 和图 2.

图 1 为文献[7]的烧蚀发动机低速段和高速段工况下的炭化层断面电镜扫描微观结构,实验采用双基推进剂,燃气中没有凝相粒子,低速段燃气速度很低,气流剥蚀可以忽略,所以图 1(a)低速段为单纯热化学烧蚀过程,图 1(b)高速段为热化学烧蚀与气流剥蚀共同存在的耦合烧蚀过程;图 2 为文献[8]的过载烧蚀发动机两个工况下的炭化层断面的电镜扫描,过载发动机采用含铝 17% 复合推进剂,通过调节部件模拟不同粒子速度冲刷条件下的烧蚀工况,图 2(a)粒子冲刷速度分别为 31 m/s,图 2(b)粒子冲刷速度为 36 m/s,过载烧蚀发动机模拟的是粒子侵蚀、气流剥蚀和热化学烧蚀同时存在的耦合烧蚀状态.

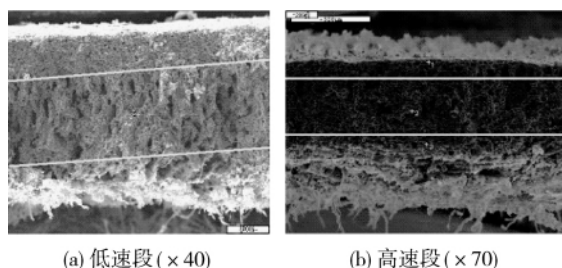


图 1 烧蚀发动机炭化层断面 SEM
(扫描电子显微镜)图像

Fig. 1 SEM(scanning electron micrograph) images
of cross-section morphologies of
charring layer-ablation motor

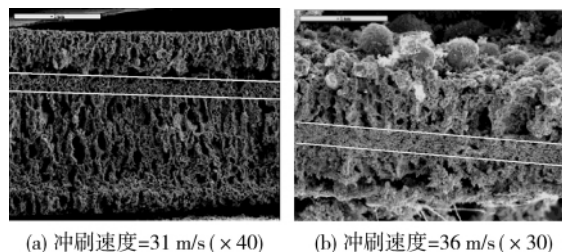


图 2 过载发动机炭化层断面 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of cross-section morphologies
of charring layer-simulating-erosion motor

通过图 1 和图 2 的炭化层微观结构可以看出无论是单纯热化学烧蚀还是多个烧蚀过程耦合的

烧蚀工况,炭化层结构可以归结为一个特点:呈致密疏松结构的非均质多孔结构(此处致密是相对的)。

首先分析炭化层的孔隙结构特点。通过测量得到各个炭化层的平均孔隙率都在 80% 左右,且炭化层内约 93% 的孔隙是连通的,孔径在 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 。炭化层的孔隙结构特点为孔隙率大,孔径小,孔隙相互连通,满足多孔介质的定义,来流燃气可以向炭化层内部扩散,和热解气体可渗透进入炭化层的多孔结构中,再发生热化学反应。

所有工况的炭化层都存在一层致密结构层,分析致密层会对烧蚀过程产生 3 个方面的影响:①阻碍了燃气中的氧化性组分向炭化层内部扩散,减缓了热化学烧蚀;②致密层强度高,提高了炭化层抵抗气流剥蚀和粒子侵蚀的能力;③阻碍了热解气体的溢出,减缓了热解过程。所以致密层的形成必须在炭化层模型中考虑。

分析致密层的形成有以下 3 种看法:

1) SiO_2 融解迁移到炭层表面形成液膜导致致密层的产生,通过能谱分析致密层内 SiO_2 的含量在 10% 以内,不可能是形成致密结构的主要因素。

2) 炭化层局部受压,变形成致密层,根据测试炭化层疏松连通,无法形成局部高压,且炭化层脆性大,受压变密可能性很小,所以这一看法可能性不大。

3) 热解气体流经炭化层,在某温度范围发生沉积,使局部炭层致密。分析认为这种可能性比较大,理由如下:激光烧蚀表面也形成致密层,说明致密层不是由燃气形成;炭化层在不同工况下其背面都是最疏松的,致密层都处于表面或中间,背面为热解形成的原始炭层,说明是热解完成后形成的。热解气体的主要组分为烷烃等小分子,这些小分子气体可以发生气相沉积。

根据沉积理论,在特定温度下气体沉积才能形成结构致密的积碳,这一点可以解释图 1、图 2 炭化层致密结构的分布差异:烧蚀发动机表面热流密度小,沉积温度线靠近炭化层表面,因此致密层也在表面,而过载发动机条件,随粒子冲刷强度增加,烧蚀表面热流密度增大,炭化层内部温度升高,沉积温度线下移,致密层就处于炭化层中间。说明沉积理论可以较好解释实验现象。

2 烧蚀模型

绝热材料烧蚀过程:在烧蚀初期表面热流作用下基体表面升温;达到热解温度后开始热解;当热解区域达到炭化温度后,热解结束,热解残余的

固相形成原始的炭化层。此时形成炭化层、热解层和基体层的 3 层烧蚀结构。燃气从烧蚀表面扩散进入炭化层,其氧化性组分与炭化层发生热化学反应使炭层疏松;热解气体从炭层底部向烧蚀表面扩散,在达到气相沉积温度线的炭化层内形成致密层;随着烧蚀过程化学反应不断进行,炭化层的质量消耗和孔隙率不断增加,当孔隙率大于某一临界值,其强度不能抵御气流冲刷或粒子侵蚀而被剥除,形成烧蚀面下移。

2.1 物理模型

根据烧蚀过程分析,考虑炭化层结构的烧蚀物理模型如图 3,各层的特性如下。

炭化层:为可渗透疏松多孔介质,存在传热、气体流动、热化学反应,热解气体沉积。其多孔结构随炭化层的生成、热化学反应及气象沉积过程变化。

热解层:存在热解和传热。

基体层:传热。

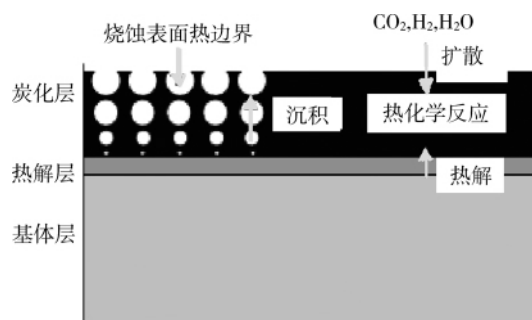


图 3 烧蚀模型

Fig. 3 Ablation model

2.2 数学模型

为分析问题的主要因素,进行如下假设:

- 1) 炭化层结构不可压;
- 2) 炭化层孔隙内部满足在固体和流体之间存在热平衡;
- 3) 炭化层内化学反应均为一级单向反应;
- 4) 炭化层中气体符合理想气体状态方程。

烧蚀过程热解层和基体层可看作固相传热,利用文献[1]的固相传热方程计算温度分布,炭化层为可渗透多孔介质,内部存在流动和传热,所以炭化层内部的动量方程、能量方程参考多孔介质的流动传热过程^[9]。

根据上述假设,参考文献[8]炭化层的内能量方程表达如下:

$$\left[\varepsilon + (1 - \varepsilon)H_c\right] \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u_j T - \frac{v}{Pr_e} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{S}{\rho_f c_{pf}} \quad (1)$$

式中

$$H_c = \frac{\rho_c c_{pc}}{\rho_f c_{pf}}, \quad Pr_e = \frac{Pr}{\varepsilon + (1 - \varepsilon)(\kappa_c / \kappa_f)}$$

其中 ρ, c_p, κ 分别为密度、比定压热容及导热系数,下标 f 和 c 分别表示炭化层内气相及固体炭层骨架的参数,炭化层内存在热化学反应, S 为热化学反应的源相,根据热化学模型确定。由于炭化层内存在气体流动,计算炭化层内部温度场需联立炭化层内的动量守恒方程和质量守恒方程,具体方程形式参考文献[9]。

除了有流动和温度传递,炭化层内部气体组分与炭化层骨架发生化学反应消耗炭化层,通过各组分质量守恒建立各个组分浓度扩散的控制方程为

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \nabla \cdot (f_i u) = \nabla \cdot [D_i \nabla (f_i)] + (\dot{\rho}_i^c + \dot{\rho}_i^s) / \rho \quad (2)$$

式中 f_i 表示 i 组分的摩尔分数; $\rho = \sum \rho_i$ 为混合气体的浓度; $\dot{\rho}_i^c$ 是化学反应的消耗源项, $\dot{\rho}_i^s$ 为热解产生的源项; D_i 为组分 i 扩散系数,根据菲克扩散定律可得

$$D_i = \frac{\mu}{\rho_i Sc}$$

Sc 是 Schmidt 数。

式(1)、式(2)联立多孔炭层的动量守恒、连续方程与可计算炭化层内的速度、温度和燃气各组分浓度分布,为烧蚀计算提供基础。为保证数值计算准确性和稳定性,采用二阶全隐格式离散及 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) 压力修正算法,数值过程参考文献[10]。

2.3 热解模型

热解过程的热解速率 α 的控制方程如下:

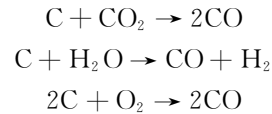
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \left(\frac{1}{\beta} \right) A \exp \left(- \frac{E}{RT} \right) f(\alpha) \quad (3)$$

A 和 E 分别热解反应的指前因子和反应活化能,其他参数根据实验确定。通过热解计算获得热解气体质量,当温度达到炭化温度,热解结束,利用控制体体积及残余固体质量换算初始炭化层孔隙率。

2.4 炭层内热化学反应

根据推进剂热力计算结果可知与炭化层发生

热化学反应的燃气组分为 $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2, \text{H}_2$ 。主要考虑炭化层内发生的热化学反应为



由 Arrhenius 公式可得各气相组分的生成消耗率,由此可得化学反应 C 的消耗率为

$$\dot{m}_c = M_c \left(\frac{2A_1 p_1 \exp(-E_1/RT)}{M_{\text{O}_2}} + \frac{A_2 p_2 \exp(-E_2/RT)}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{A_3 p_3 \exp(-E_3/RT)}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (4)$$

A_1, A_2, A_3 和 E_1, E_2, E_3 分别对应为上面 3 个反应方程的指前因子和反应活化能,具体参数参考文献[1]; p_i 为气体 i 在炭化层孔隙内的分压。根据假设气体满足理想气体状态方程,气体从边界层进入到炭化层孔隙内,在气体温度不变的情况下,有

$$p_i = \frac{1}{\varepsilon} p_e Y_i \frac{1}{M_i} \frac{1}{\sum_i Y_i / M_i} \quad (5)$$

式中 Y_i 为 i 组分浓度; p_e 为附面层内压强, M_i 为 i 组分的分子量。得出 p_i 后,就可根据公式(4)计算出炭化层内的单位反应面积上质量消耗率 $\dot{m}_c$ 。

在已知反应前 ε ,根据质量守恒定律可推出化学反应后新的孔隙率 ε' 为

$$\varepsilon' = 1 - (1 - \varepsilon)(1 - \dot{m}_c f_c \Omega \Delta t) \quad (6)$$

式中 Ω 为比表面积, f_c 为炭化层碳元素质量分数, Δt 为计算的时间步长。由公式(6)可计算随热化学烧蚀过程炭化层孔隙结构的变化。

2.5 致密层过程数值拟合

气相沉积理论可以较好地解释致密层的形成规律,但气体沉积过程是一个非常复杂的物理化学过程,很难建立精确数值方法描述,所以本文在气相沉积理论的基础上,根据实验结果数值拟合的致密层形成过程。

参考文献[11]中丙烯的沉积温度作为热解气体在炭化层中的沉积温度 T_{crit} ,根据炭化层的电镜照片可认为致密层为均质结构,孔隙率为 $\varepsilon_{\text{crit}}$ (通过实验测量确定)。在每一时刻热解计算后得到热解气体质量为 m_0 ,根据文献由于气相沉积是在一定温度以上发生的,所以模型炭化层 j 点达到沉积温度 T_{crit} ,热解气体的总质量的质量分数 a 开始由 j 点开始沉积,具体修正算法如下。

1) 初始化

$$s_s = \alpha m_0, \quad jj = j$$

2) 循环修正

$$\text{当} \quad s_s < (\epsilon_{jj} - \epsilon_{\text{crit}}) \rho_c, \\ \epsilon'_{jj} = \epsilon_{jj} - s_s / \rho_c, \\ s_s = 0$$

否则

$$\epsilon'_{jj} = \epsilon_{\text{crit}}, \quad s_s = \alpha m_0 - (\epsilon_{jj} - \epsilon_{\text{crit}}) \rho_c$$

3) 当 $s_s = 0$, 修正结束, 否则 $jj = jj - 1$, 返回第 2 步, 进行下 1 个节点的修正。

根据上述算法, 绝热材料温度场的分布和热解过程决定了致密层的形成位置和形成厚度, 反应了沉积原理, 沉积的热解气体的质量分数 α 为根据实验结果确定的经验常数。

3 烧蚀计算

本文模型未考虑粒子侵蚀和气流剥蚀作用, 所以选取烧蚀发动机内双基推进剂条件下的工况作为模型验证计算工况。烧蚀发动机实验段结构如下图 4 所示, 由低速实验段、过渡段和高速实验段组成, 各段采用法兰连接, 通过改变高速实验段的横截面积和喉部面积调节实验段的流速和压强, 并安装有压力测试系统以获取实验过程的压强; 实验工况: 燃气温度为 3289 K, 压强为 6 MPa, 工作时间为 9 s, 通过数值计算, 低速段燃气和高速段燃气速度分别为 2.4 m/s 和 42 m/s。

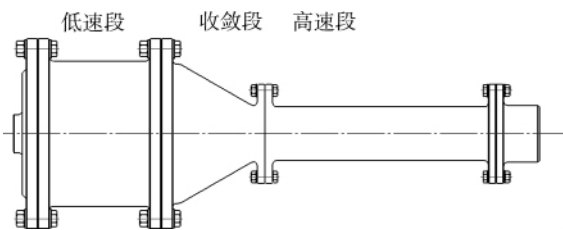


图 4 烧蚀发动机结构示意图

Fig. 4 Structure sketch of ablation motor

3.1 计算边界条件及输入参数

发动机内绝热层的侧壁和背壁假定为绝热边界条件, 烧蚀面边界条件为

$$k_f \frac{\partial T}{\partial y} = \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{rad}} \quad (7)$$

$\dot{q}_{\text{conv}}$ 为对流换热热流密度, 利用 Bartz 公式计算, $\dot{q}_{\text{rad}}$ 为热辐射热流密度, 根据文献[12]辐射热流率公式计算, 根据不同工况的燃温、压强、燃气速度计算边界热流密度。组分扩散的浓度边界由双基推进剂热力计算结果给出 CO_2 , H_2O , O_2 的浓度。

3.2 计算结果及分析

计算得到的烧蚀发动机高速段 EPDM 试件的炭化率随时间的变化如图 5, 炭化率在初始阶段快速增加至最大值随后下降, 4 s 后逐渐稳定。说明初始阶段绝热材料表面热流密度强且表面生成的炭化层薄, 绝热材料内部升温速率高, 炭化率大, 随着表面温度升高, 对流换热减小, 炭化层厚度增加, 炭化层热阻能力增加, 绝热材料内部传热减缓, 炭化率下降并逐渐稳定。

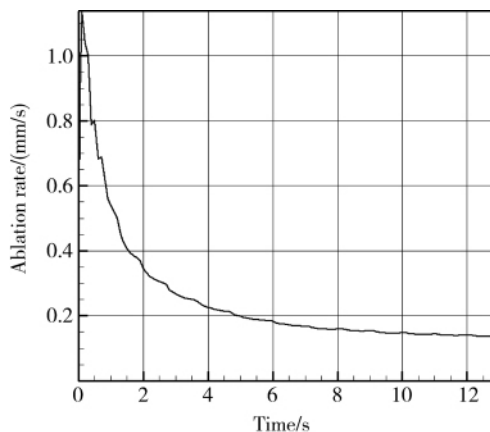


图 5 炭化率随时间变化

Fig. 5 Ablation rate vs. time

由于致密层模型是在对其机理分析的基础上的根据实验结果拟合建立的, 为验证其合理性, 计算了未考虑致密层和考虑致密层形成的烧蚀过程。表 1 为烧蚀发动机低速段和高速段的实验和两种计算方法得到对应 9 s 的炭化烧蚀率和质量烧蚀率, 实验结果参考文献[7]。

表 1 实验结果及计算结果

Table 1 Test datas and computational results

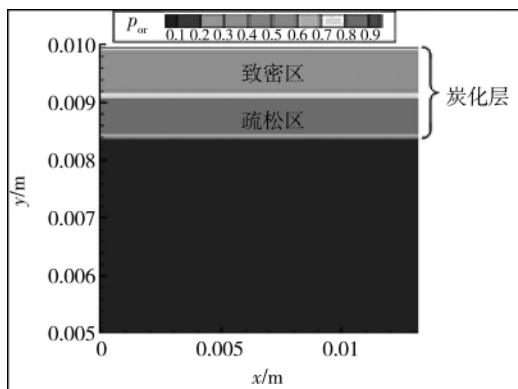
测试段	低速段	高速段
燃气速度/(m/s)	2.4	42
炭化率/(mm/s)		
实验结果	0.116	0.121
无致密层	0.215	0.255
有致密层	0.147	0.175
质量烧蚀率/(kg/(s · m ²))		
实验结果	0.093	0.127
无致密层	0.326	0.396
有致密层	0.098	0.160

由表 1 计算结果可以看出: 计算得到的炭化率、质量烧蚀率随燃气速度增加而增加, 与实验结果规律一致。不考虑致密层计算得到的炭化率和

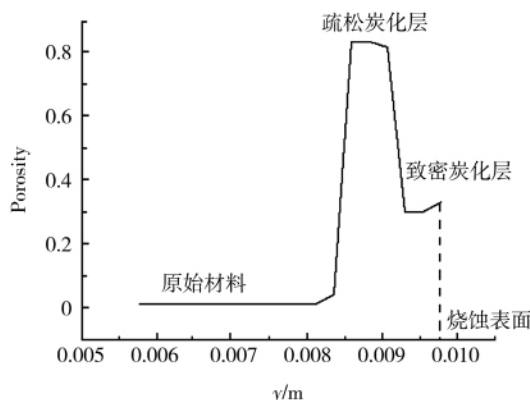
质量烧蚀率远大于实验结果,质量烧蚀率达到实验结果的3倍,烧蚀计算结果与实验相比误差过大;考虑致密层计算得到低速段和高速段的炭化率与实验结果的误差分别为0.031 mm/s和0.054 mm/s,平均误差0.04 mm/s;低速段和高速段质量烧蚀率分别为0.005(kg/(s·m²))和0.033(kg/(s·m²)),平均误差为0.019(kg/(s·m²)).对比实验与计算结果,证实了致密层拟合模型符合真实的炭化层结构特点,提高模型计算精度.所以考虑炭化层致密/疏松结构的EPDM烧蚀模型符合烧蚀过程,可以准确预测绝热材料烧蚀性能.

炭化层孔隙率的大小能够体现炭化层的结构

强度,粒子侵蚀和气流剥蚀作用的大小与炭化层结构强度紧密相关,准确计算是验证本模型能否与粒子侵蚀、机械破坏模型耦合的关键.图6和图7为两个燃气速度下炭化层孔隙结构,图6(a),图7(a)为计算得到孔隙率分布云图,图6(b),图7(b)为孔隙率随y方向的分布曲线.从图6和图7可见在烧蚀表面都形成一层致密层结构,低速段炭化层未出现烧蚀,而高速段炭化层上部分已出现烧蚀表面推移;低速段的炭化层厚度和致密层厚度均大于高速段,与图1一致,说明本文建立的烧蚀模型可准确模拟炭化层疏松/致密结构的形成过程.



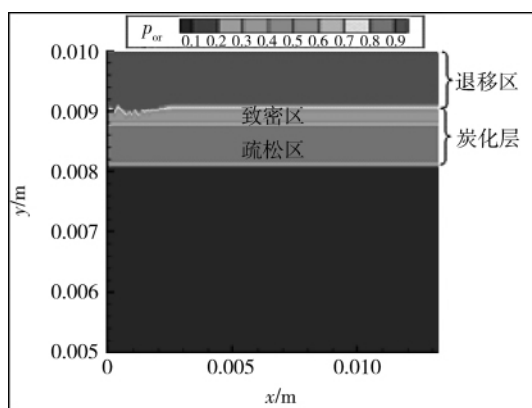
(a) 孔隙率分布云图



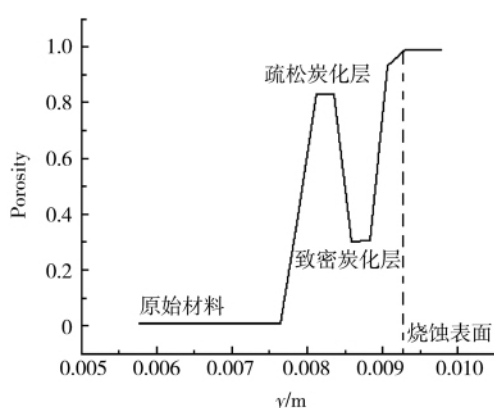
(b) y方向孔隙率分布曲线

图6 低速段炭化层孔隙率分布

Fig. 6 Porosity distribution of charring layer-low velocity



(a) 孔隙率分布云图



(b) y方向孔隙率分布曲线

图7 高速段炭化层孔隙率分布

Fig. 7 Porosity distribution of charring layer-high velocity

4 结 论

本文针对EPDM的烧蚀实验结果分析烧蚀机理,建立考虑炭化层疏松/致密结构的烧蚀模

型,主要结论如下:

- 1) 炭化层是多孔疏松结构,在烧蚀模型中得到考虑炭化层是耦合热化学烧蚀和机械剥蚀的纽带.
- 2) 初步确定热解气体沉积是炭化层中致密

结构的形成的主要原因,并根据沉积理论拟合致密层数值算法。

3) 建立考虑炭化层致密/疏松结构的烧蚀物理模型,基于多孔介质传热传质数值算法建立数学模型和计算程序。

4) 本模型模拟烧蚀发动机工况得到炭化率和质量烧蚀率与实验结果较吻合,得到炭化层孔隙率分布规律与实验炭化层结构规律一致。

在本文模型的基础上,可通过进一步建立粒子侵蚀和气流剥蚀破坏炭化层的临界强度准则,判断疏松/致密的炭化层表面推移情况,将热化学模型与气流剥蚀、粒子侵蚀通过炭化层结构强度耦合在一起,建立耦合烧蚀模型。

参考文献:

- [1] 何国强. 包覆层烧蚀性能计算及实验分析[D]. 西安:西北工业大学,1988.
HE Guoqiang. Calculation and analysis of ablation experiment of a liner inhibitor[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University,1988. (in Chinese)
- [2] Yang B C. A theoretical study of thermo-mechanical erosion of high-temperature ablatives[D]. PA, USA: University of Pennsylvania,1992.
- [3] Yang B C, Cheung F B, Koo J H. Modeling of one-dimensional thermomechanical erosion of high temperature ablatives [J]. Journal of Applied Mechanics,1993,60(4):1027-1032.
- [4] 何洪庆,严红. EPDM 的烧蚀模型[J]. 推进技术,1999,20(4):36-39.
HE Hongqing, YANG Hong. Ablation model of EPDM [J]. Journal of Propulsion Technology,1999,20(4):36-39. (in Chinese)
- [5] 易法军,孟松鹤,梁军,等. 防热复合材料高温体积烧蚀模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(6):725-728.
YI Fajun, MENG Songhe, LIANG Jun, et al. A high-temperature volumetric ablation model for thermal protective composites[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2001,33(6):725-728. (in Chinese)
- [6] 余晓京,何国强,李江,等. 富氧环境下绝热层烧蚀模型[J]. 固体火箭技术,2006,29(2):113-116.
YU Xiaojing, HE Guoqiang, LI Jiang, et al. Ablation model of insulation in oxygen-rich environment[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2006,29(2):113-116. (in Chinese)
- [7] 刘泽祥. 绝热材料炭化层制备技术及剥落机理试验研究[D]. 西安:西北工业大学,2009.
LIU Zexiang. Production technology of char layer of insulator and experimental investigation of erosion mechanism [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University,2009. (in Chinese)
- [8] 刘洋,丽江,何国强,等. 颗粒冲刷条件下三元乙丙绝热材料烧蚀特性实验[J]. 推进技术,2010,31(5):612-617.
LIU Yang, LI Jiang, HE Guoqiang, et al. Experiment on ablation characteristic of EPDM insulator under particles erosion condition[J]. Journal of Propulsion Technology,2010,31(5):612-617. (in Chinese)
- [9] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [10] 杨飒. 基于炭层孔隙结构的热化学烧蚀模型研究[D]. 西安:西北工业大学,2009.
YANG Sa. Thermo-chemical ablation model of ablative materials considering structure of charred layer[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University,2009. (in Chinese)
- [11] 尹洪峰,徐永东,张立同. 热解条件对热解碳沉积模式和形貌的影响[J]. 无机材料学报,1999,14(5):69-74.
YIN Hongfeng, XU Yongdong, ZHANG Litong. Effect of deposition on deposition mode and morphology of pyrolytic carbon[J]. Journal of Inorganic Materials,1999,14(5):69-74. (in Chinese)
- [12] 徐善玮,侯晓,张宏安. 固体火箭发动机内绝热层烧蚀质量损失计算[J]. 固体火箭技术,2003,26(3):28-31.
XU Shanwei, HOU Xiao, ZHANG Hongan. Calculation of internal insulation ablation mass loss of solid rocket motor [J]. Journal of Solid Rocket Technology,2003,26(3):28-31. (in Chinese)