

热解气体流动的二维烧蚀热防护数值仿真研究

张 涛

(中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

摘 要: 研究了热解型碳化复合材料二维烧蚀的计算模型和计算方法。采用碳化层—热解面—原始材料层模型;将热解气体与碳化层之间的换热作为热载荷处理;计算了热解气体在碳化层中的流动和传热过程,获得了热解气体质量流量分布从而为烧蚀材料温度场计算提供边界条件。计算结果表明热解气体质量流量在碳化层明显成二维分布,不同位置的流量相差很大,并且对碳化层温度和烧蚀率有很大影响,因此,内部热响应计算需要考虑热解气体在碳化层中的流动和换热过程。

关键词: 烧蚀热防护; 内部热响应; 热解气体流动; 数值仿真

中图分类号: V423 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2014)01-0119-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.01.016

Numerical Simulation Research on Two-Dimensional Ablative Thermal Protection with Pyrolysis Gas Flow

ZHANG Tao

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Both numerical simulation model and computational method of internal thermal response of carbonized composite material with pyrolysis reaction are researched deeply. At first, the method of ablative rate computation is researched. A charring layer-pyrolysis surface-original material layer model is applied and convection heat transfer between pyrolysis gas and charring layer is treated as heat source. The mass flux distribution of pyrolysis gas is obtained by computing flow and heat transfer process of pyrolysis gas inside charring layer and provides boundary conditions for temperature computation of ablative material. It is demonstrated by computational results that the mass flux of pyrolysis gas is two-dimensional distribution and it has big difference in different position; the pyrolysis gas has important effect on temperature of charring layer and ablative rate; internal thermal response computation needs to consider the flow and heat transfer process of pyrolysis gas inside the charring layer.

Key words: Ablation thermal protection; Internal thermal response; Pyrolysis gas flow; Numerical simulation

0 引 言

碳化复合材料是高速飞行器和固体火箭发动机喷管的理想烧蚀热防护材料^[1-2]。对碳化复合材料的烧蚀机理的研究表明碳化型材料在受热时会发生热解,释放出热解气体。将烧蚀完成后的碳化材料进行电镜扫描观察,碳化层为疏松的多孔结构。整个烧蚀过程中,热解气体流经碳化层注入边界层中。

由于热解气体对边界层的影响,引起进入碳化层的热流的降低,起到热阻塞的作用;同时热解气体流经碳化材料时引起碳化层温度场降低,起到冷却剂的作用。现有的模型大部分都假设热解气体生成后瞬间释放到边界层中,忽略了热解气体在碳化层中的流动传热对碳化层的影响,这种假设在碳化层厚度较小时是可以的。基于上述假设,文献[3-5]采用一维模型对热解型碳化材料内部热响应进行了研究

和计算;文献[6-9]基于有限体积法,采用二维和轴对称模型对烧蚀热防护进行了数值计算研究。但当碳化层较厚时,热解气体将对材料内部的温度场产生较大的影响,继续采用这种假设将产生一定误差,因此有必要对热解气体在碳化层中的流动传热进行研究。文献[10]计算了一维模型下热解气体在碳化层的流动过程,但多数情况烧蚀计算需要考虑多维效应。

本文采用二维模型,研究热解型碳化复合材料烧蚀率和内部热响应的计算模型和计算方法,包括:烧蚀率计算方法;热解气体流动计算;温度场计算以及热解气体流动对传热和烧蚀的影响。

1 烧蚀率计算

本文将碳化复合材料的烧蚀过程简化为化学动力学和扩散控制、氧化扩散控制、升华扩散控制三个极限过程。计算中假设如下:所有化学反应均发生在表面而且达到平衡;传热系数和传质系数相等^[1-2]。

当温度较低时,烧蚀速率由表面化学动力学因素与扩散因素共同决定。化学动力学控制的反应速率由 Arrhenius 公式计算;扩散控制的反应速率由扩散速度控制。根据壁面组元质量守恒和相容条件^[4],表面烧蚀率为

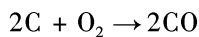
$$\dot{m}_c = \frac{\tilde{C}_{O_e}}{h_{re}(1+B_w+B_p)} \left(\frac{1}{\alpha_c} + \frac{1}{\alpha_d} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$B_w = \frac{\dot{m}_c h_{re}}{\psi q_0} \quad (2)$$

$$B_p = \frac{\dot{m}_p h_{re}}{\psi q_0} \quad (3)$$

其中, B_w 和 B_p 为无因次质量系数; \dot{m}_c 为化学烧蚀质量损失率; α_c 和 α_d 分别为化学动力学控制和扩散控制质量消耗率; \dot{m}_p 为热解气体流量; q_0 为冷壁热流; h_{re} 为恢复焓; ψ 为质量引射效率因子。

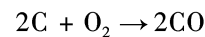
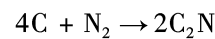
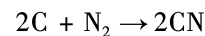
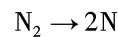
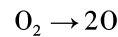
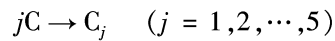
当温度较高时,碳的氧化反应生成物全部为 CO 气体,表面氧化反应为



此时表面上含有 CO、O₂、N₂、热解气体 4 种组元,根据壁面组元质量守恒条件,相应的壁面浓度为^[1-2]

$$\begin{cases} C_{CO_w} = \frac{M_{CO}}{M_C} \frac{B_w}{1+B_w+B_p} \\ C_{O_2w} = \frac{\tilde{C}_{O_e}}{1+B_w+B_p} - \frac{M_{O_2}}{M_{CO}} C_{CO_w} \\ C_{N_2w} = \frac{\tilde{C}_{N_e}}{1+B_w+B_p} \\ C_p = \frac{B_p}{1+B_w+B_p} \end{cases} \quad (4)$$

在碳的升华温度下,在壁面还将发生碳-氮反应,气体中存在 O₂、O、N₂、N、CO、CN、C₂N、C₁、C₂、C₃、C₄、C₅ 和热解气体 p 等 13 个组元,壁面处反应有^[1-2]



由化学反应式建立元素质量浓度与组元质量浓度之间的关系如下^[1-2]

$$\begin{cases} \tilde{C}_C = \sum_{j=1}^5 C_j + \frac{M_C}{M_{CO}} C_{CO} + \frac{M_C}{M_{CN}} C_{CN} + \frac{2M_C}{M_{C_2N}} C_{C_2N} \\ \tilde{C}_O = C_O + C_{O_2} + \frac{M_O}{M_{CO}} C_{CO} \\ \tilde{C}_N = C_N + C_{N_2} + \frac{M_N}{M_{CN}} C_{CN} + \frac{M_N}{M_{C_2N}} C_{C_2N} \\ \tilde{C}_p = C_p \end{cases} \quad (5)$$

其中 C 和 \tilde{C} 分别为组元质量浓度和元素质量浓度。

组元浓度 C_i 与分压 P_i 满足关系式^[1-2]

$$C_i = \frac{P_i}{P} \frac{M_i}{M_{av}} \quad (6)$$

其中 M_i 组元 i 的分子量; M_{av} 为气体平均分子量; P 为混合气体压强。根据式(1)至(6),通过化学动力学参数和化学平衡常数可以计算给定温度和压强下的烧蚀率。

2 内部热响应计算

2.1 模型分析

碳化复合材料在加热过程中,内部出现激烈的热解反应。在此过程中,材料内部的热解过程主要

发生在一定范围内,其余材料的热解相对较小,因此为使问题简化,模型中将烧蚀材料分为碳化层、热解层和原始材料层。经过研究发现,由于使用环境恶劣,热流很高,因此材料的热解层很薄,其厚度可以忽略不计,由此热解层模型进一步简化为热解面模型,即材料内部分为碳化层,热解面和原始材料层。其中热解面由温度确定。

热解气体在压力梯度的驱动下流过多孔状的碳化层,注入到边界层中。因此有必要在计算绝热材料热响应时考虑热解气体的流动影响。

通过以上分析,本文在计算时作如下简化和假设^[1-2,11-14]:

(1) 碳化复合材料烧蚀过程中分为碳化层—热解面—原始材料三层结构;(2) 材料内部的热解反应发生在热解面上,热解面保持定温;(3) 热解气体与碳化层为瞬态热平衡。

2.2 烧蚀材料温度场计算^[1-2,10,13]

原始材料层的传热控制方程:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_1 \nabla T) \quad (7)$$

碳化层的传热控制方程:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_2 \nabla T) + \dot{m}_p c_p \nabla T \quad (8)$$

烧蚀边界边界条件:

$$-\lambda \nabla T = q_N \quad (9)$$

热解面边界条件:

$$\begin{cases} T = T_p \\ -\lambda_1 \nabla T_1 = -\lambda_2 \nabla T_2 + \dot{m}_p h_p \end{cases} \quad (10)$$

q_N 为热流密度; ρ, c, λ, h 分别表示密度、比热、导热系数和热解潜热。下标 1 表示碳化层;2 表示原始材料层; p 表示热解气体。 q_N 为^[1-2]:

$$q_N = (q_{\text{rad}})_{\text{net}} + q_f + \dot{m}_p h_p + q_{\text{imp}} + q_a - (\rho v)_w h_w - q_c \quad (11)$$

$(q_{\text{rad}})_{\text{net}}$ 为燃气与烧蚀表面之间的净辐射热流; q_f 为燃气与碳化层表面的对流换热; $(\rho v)_w h_w$ 为气体喷射总体运动带走的焓; $\dot{m}_p h_p$ 为热解气体的焓; q_{imp} 为颗粒撞击时的热增量; q_c 为碳化层剥蚀带走的热量; q_a 为碳化层烧蚀化学反应的放热。

为了与热解气体在碳化层中的流动实现耦合计算,采用有限体积法计算烧蚀材料温度场以及热解气体在碳化层的流动和传热过程。

2.3 热解气体流动计算

热解面的位置由热解温度 T_p 确定,根据热解面边界条件可得热解气体质量流量为

$$\dot{m}_{p0} = \frac{\lambda}{h_p} \nabla T_{E_p} \quad (12)$$

其中 E_p 为热解面所在单元。

要获得热解气体在整个碳化层的流量密度分布,需要计算热解气体的流动过程。热解气体在热解面产生流经碳化层后进入边界层。因为碳化层属于多孔介质,遵循多孔介质中流动传热的基本规律^[15-16]。

碳化层中,热解气体连续方程为

$$\frac{\partial (\rho_p \varepsilon_p)}{\partial t} + \nabla (\rho_p V_p) = 0 \quad (13)$$

热解气体流动速度满足多孔介质 Darcy 定律

$$V_p = -\frac{K}{\mu} \nabla P_p \quad (14)$$

其中 ε_p 为材料孔隙率; K 为材料的渗透率; μ 为热解气体的动力粘性系数; P 为气体压强。

气体状态方程为

$$P_p = \rho_p R T_p \quad (15)$$

其中热解气体的温度 T_p 由烧蚀材料温度场计算得到。求解方程(13)至(15)的边界条件为:

碳化层外边界条件

$$P = P_e \quad (16)$$

热解面边界条件

$$\dot{m}_p = \dot{m}_{p0} \quad (17)$$

P_e 为外流壁面压强。

3 计算结果与分析

将本文模型和方法在 VC++ 平台下开发的软件中实施,该有限元程序的有效性已在作者已发表文献[17]中进行了论述。采用图 1 所示的区域研究热解气体在碳化层中流动特性以及对烧蚀的影响。其中外边界的冷壁热流如图 2 所示,驻点热流 4.25 MW/m^2 ;表面压力为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$;气体总焓 16 MJ/kg 。加热时间 60 s 。材料参数如表 1 所示。

表 1 材料模型

Table 1 Material properties

	$\rho / (\text{kg/m}^3)$	$c / \text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	$\lambda / \text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$
原始材料	1200	1600	0.25
碳化层	450	2300	0.5

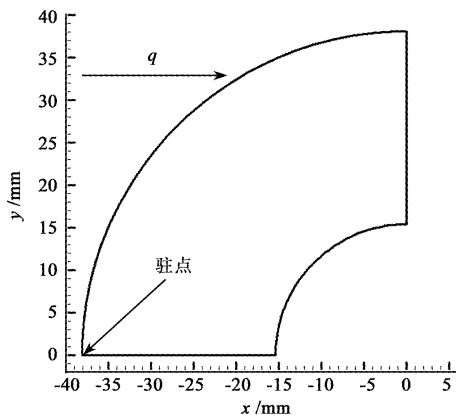


图 1 计算域示意图

Fig. 1 Sketch map of computation field

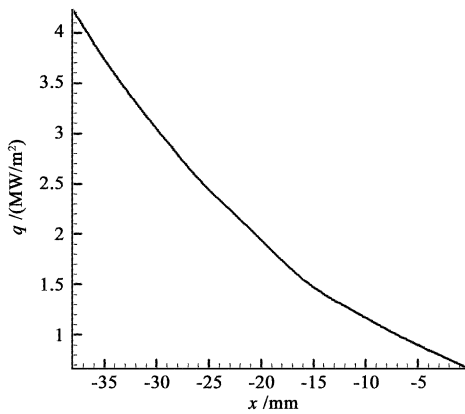


图 2 冷壁热流

Fig. 2 Heat flux of cold wall

热解气体比热 $c_p = 3.20 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 热解热 $h_p = 450 \text{ kJ}/\text{kg}$; 热解温度 $T_p = 673 \text{ K}$; 气体粘性系数 $\mu = 3.5 \times 10^{-5}$; 烧蚀材料孔隙率 $\varepsilon_p = 0.35$; 渗透率 $K = 3.0 \times 10^{-13}$ 。

图 3 为 60s 时材料的温度场分布; 图 4 和图 5 分别为碳化层热解气体压强和密度分布; 图 6 至图 8 分布为碳化层热解气体总质量流量、 x 和 y 方向质量流量; 图 9 为驻点在热解面的热解气体质量流量; 图 10 和图 11 分别为驻点温度和烧蚀率。

从图 3 中可以看出, 外壁面温度很高, 碳化层沿厚度方向温度梯度较大, 而原始材料层温度较低且温度梯度较小。这主要是由于材料层导热系数较小。同时可以看出, 沿 x 方向温度逐渐降低, 与冷壁热流分布趋势一致。

从图 4 可以看出, 热解面附近的压强明显高于烧蚀面。随着热解反应的进行, 热解气体的生成率加快, 孔隙中的气体压力迅速增加, 当压力达到基体材

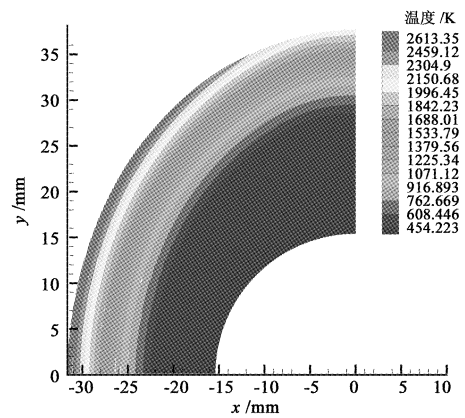


图 3 60s 温度场分布

Fig. 3 Temperature at 60s

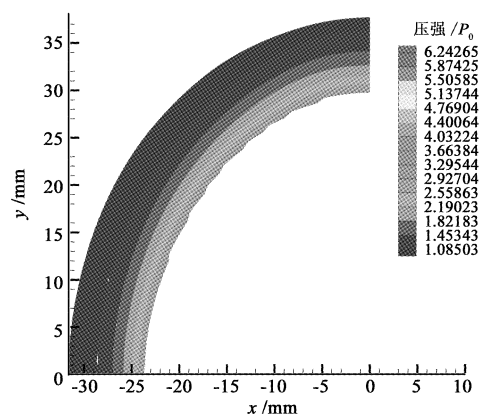


图 4 60s 碳化层压强分布

Fig. 4 Pressure in charred layer at 60s

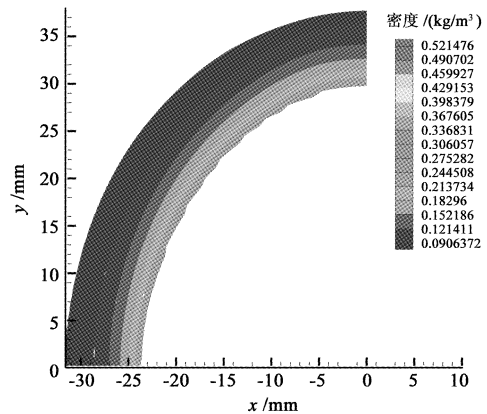


图 5 60s 热解气体密度分布

Fig. 5 Density of pyrolysis gas in charred layer at 60s

料破坏强度的时候, 气体开始从材料中溢出。因此, 压强沿厚度方向逐渐降低。如图 5 所示, 由于热解面压强较高而温度远低于烧蚀面, 因此热解面的热解气体密度明显高于烧蚀面。

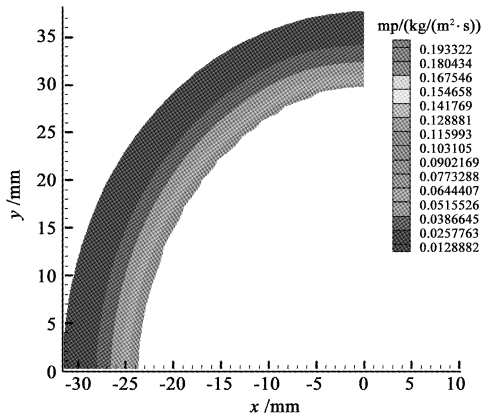


图 6 60s 热解气体质量流量分布

Fig. 6 Pyrolysis gas mass flux in charred layre at 60s

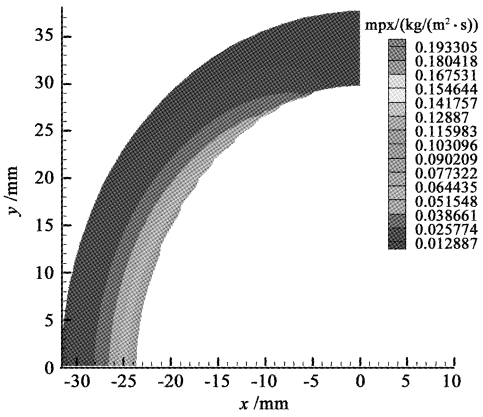


图 7 60s 热解气体 x 方向质量流量分布

Fig. 7 Pyrolysis gas mass flux in x direction at 60s

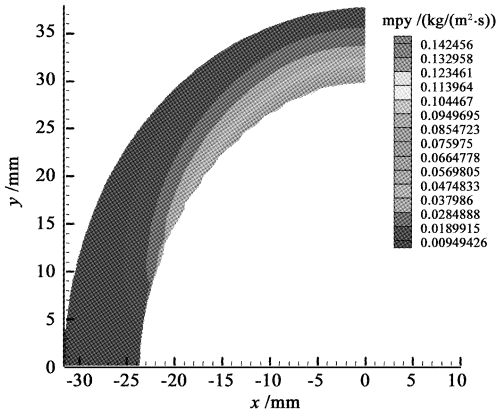


图 8 60s 热解气体 y 方向质量流量分布

Fig. 8 Pyrolysis gas mass flux in y direction i at 60s

从图 6 至图 8 可以看出, 碳化层同一厚度的热解气体总的质量流量相差较小; 而 x 和 y 方向的流量分量在不同位置相差很大, 明显成二维分布。在计算烧蚀材料温度场时, 需要知道每个单元内的热解气

体质量流量, 因此为了准确计算热解气体对传热和烧蚀的影响需要计算其在碳化层的多维流动。

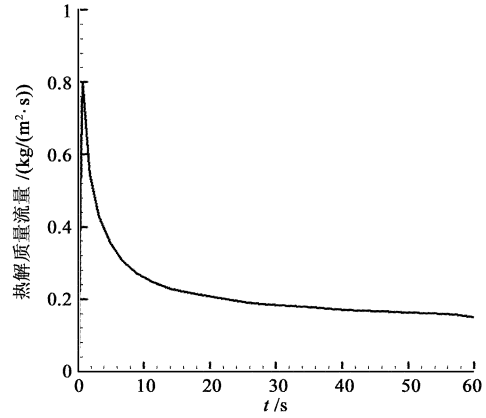


图 9 驻点热解面位置热解气体质量流量

Fig. 9 Pyrolysis gas mass flux on pyrolysis surface of stagnation point

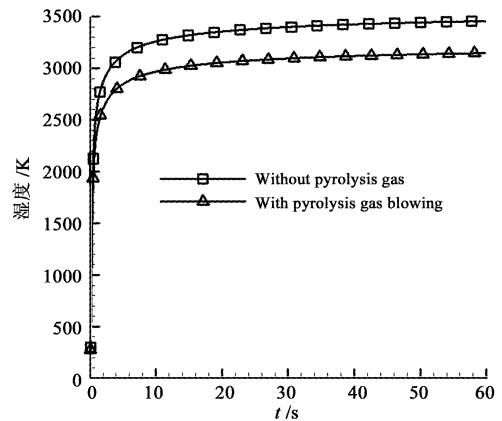


图 10 驻点温度

Fig. 10 Temperature on stagnation point

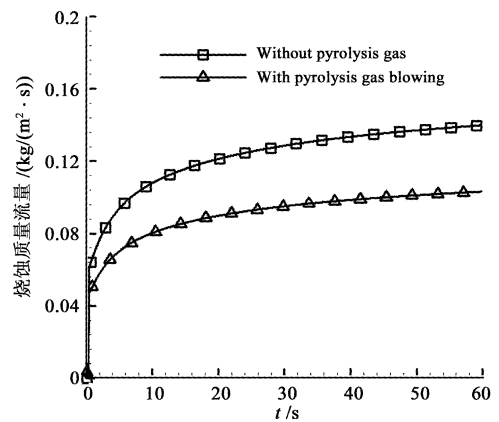


图 11 驻点烧蚀率

Fig. 11 Ablation mass flux on stagnation point

从图 9 可以看出,驻点位置在很短时间内就开始热解反应。热解气体质量流量很快达到最大值。然后迅速下降,到达 10s 趋于平稳,变化很小。从图 10 可以看出,驻点一开始温度升高很快,10s 后变化很小。这说明热解反应不仅与温度有关,还与温度变化速率有关。对比图 10 和图 11 可以看出,热解气体对温度和烧蚀率的影响较大。当考虑热解气体的影响时,温度和烧蚀率明显降低。这说明热解气体在碳化层的流动有降温的作用;同时热解气体流入边界层时,减弱了壁面的烧蚀,起到了烧蚀阻塞作用。

4 结 论

本文采用碳化层—热解面—原始材料层的物理模型,对热解型碳化复合材料内部热响应数值仿真关键技术进行了研究,重点计算和分析了热解气体对传热和烧蚀的影响。通过以上分析可以得出如下结论:

(1) 由于热解气体流动对传热和烧蚀有重要影响,必须详细计算其在碳化层中的流动状况。

(2) 热解气体在碳化层中的流动成二维分布,热响应计算必须考虑多维效应。

(3) 热解气体在碳化层中的流动使壁面温度和烧蚀率明显降低。

参 考 文 献

- [1] 张志成. 高超声速气动热和热防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003:222-317.
- [2] 白光辉,孟松鹤,张博明,等. 碳/碳材料体积烧蚀实验研究[J]. 宇航学报,2007,28(4):812-815. [Bai Guang-hui, Meng Song-he, Zhang Bo-ming, et al. Experimental study on carbon/carbon volume ablation[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4):812-815.]
- [3] Blackwell B F. Numerical prediction of one-dimensional ablation using a finite control volume procedure with exponential differencing[J]. Numerical Heat Transfer, 1998, 14(1): 17-34.
- [4] Goeken T, Chen Y K, Skokova K A, et al. Computational analysis of arc jet wedge tests including ablation and shape change[C]. 10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Chicago, USA, June28-July 1, 2010.
- [5] Amar A J, Blackwell B F, Edwards J R. One-dimensional ablation using a full Newton's method and finite control volume procedure[J]. Journal of Themophysics and Heat Transfer, 2008, 22(1): 77-82..
- [6] Subrahmanya S, Katte S K, Das S P. Two-dimensional ablation in cylindrical geometry[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2000, 14(4): 548-556.
- [7] Hogan R E, Blackwell B F, Cochran R J. Numerical solution of two-dimensional ablation problems using the finite control volume method with unstructured grids[R]. AIAA 94-2085.
- [8] Blackwell B F, Hogan R E. Numerical solution of axis symmetric heat conduction problems using finite control volume technique [J]. Journal of the Mophysics and Heat Transfer, 1993,7(3): 462-471.
- [9] Hogge M, Gerrekens P. Two-dimensional deforming finite element methods for surface ablation[R]. AIAA 83-1555.
- [10] Amar A J, Blackwell B F, Edwards J R. One-dimensional ablation with pyrolysis gas flow using a full Newton's Method and finite control volume procedure[R]. AIAA 2007-4535.
- [11] Agrawal P, Ellerby D T, Switer M R et al. Multidimensional testing of thermal protection materials in the arc jet test facility [C]. 10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Chicago, USA, June28-July 1, 2010.
- [12] Jaworske D A, Gaier J R, Podojil G M, et al. Durability of carbon-carbon composites to a simulated martian atmosphere [R]. AIAA 94-2629.
- [13] Hugh L N M, Gerorge S S. High temperature thermomechanical behavior of carbonphenolic and carbon-carbon composites [J]. Journal of Composite Materials, 2006, 26(2):206-229.
- [14] Murray A L, Russell G W. Coupled aero heating/ablation analysis for missile configurations[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002,39(4): 468-475.
- [15] Yuan R, Albert S K. Study on fluid flow passing through a porous media [J]. ACTA Analysis Functionals Application, 2011,13(4): 357-365.
- [16] 邓彩华,童亮,陈壁峰,等. 多孔介质流动的直接数值模拟 [J]. 武汉理工大学学报,2011,35(6):1257-1260. [Deng Cai-hua, Tong Liang, Chen Bi-feng, et al. Direct numerical simulation for fluid flow in porous media[J]. Journal of WuHan University of Technology,2011,35(6):1257-1260.]
- [17] 张涛,孙冰. 固体火箭发动机绝热层温度场的有限元计算方法 [J]. 航空动力学报,2009,24(6):1407-1412. [Zhang Tao, Sun Bing. Numerical computation of solid rocket motor insulation layer temperature by finite element method[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6):1707-1412.]

作者简介:

张涛(1982-),男,博士,主要从事高超声速热防护研究。

通信地址:四川绵阳涪城区剑门路西段 278 号 3 号门 (621000)

E-mail:zt19181918@163.com

(编辑:张宇平)