

文章编号:1000-8055(2013)09-1962-05

含碱金属杂质的高超声速烧蚀流场特性数值模拟

柴 栋, 方洋旺, 童中翔, 高 翔

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对高超声速飞行器的烧蚀现象, 采用 Newton 迭代的空问推进方法, 数值求解化学非平衡的抛物化 Navier-Stokes(PNS)方程. 以黏胶基碳布-氨酚醛树脂为烧蚀材料, 建立了含碱金属杂质的 18 组分 33 反应的化学反应模型, 计算了小钝锥体的壁面温度, 并和现有文献结果进行对比验证. 在此基础上, 对含碱金属杂质的高超声速烧蚀流场进行了模拟, 深入分析了含碱金属杂质的烧蚀反应对流场温度、压力和电子数密度的影响. 结果表明: 烧蚀反应使得流场温度较非烧蚀情况增加了 10%~15%; 考虑碱金属杂质 Na 后, 流场电子数密度增大了 1~2 个数量级.

关 键 词: 高超声速; 烧蚀; 流场; 碱金属杂质; 化学非平衡

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Numerical simulation of characteristic of hypersonic ablation flow field containing alkali-metal impurities

CHAI Dong, FANG Yang-wang, TONG Zhong-xiang, GAO Xiang

(School of Aeronautic and Astronautic Engineering,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: As for the ablation of hypersonic vehicles, the parabolized Navier-Stokes (PNS) equations of chemical non-equilibrium were calculated numerically based on a kind of Newton-type iteration method. The chemical model of 18 species 33 reactions containing alkali-metal impurities was established on the basis of a carbon-phenolic ablative material. Firstly, the wall temperature of small blunt cone was computed and the numerical results were validated by comparing with those in a reference. Then, the hypersonic ablation flow field containing alkali-metal impurities were simulated and the effects of ablation reactions on the flow parameters were deeply analyzed. The results show that compared with non-ablation condition, the temperature of flow field increases by 10% to 15% in ablation reactions. And the electron number densities increase by 1 to 2 orders of magnitude after taking alkali-metal Na into consideration.

Key words: hypersonic; ablation; flow field; alkali-metal impurities; chemical non-equilibrium

飞行器以高超声速在大气中飞行时, 由于激波压缩和黏性阻滞作用, 其周围流场会产生局部的化学非平衡效应, 引起复杂的离解和电离反应,

使得飞行器产生等离子体包覆流场并在尾部发展成等离子体尾迹, 对研究飞行器流场及目标特性有重要意义.

收稿日期: 2012-09-10

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.1962_022.html

基金项目: 国家自然科学基金(61172083)

作者简介: 柴栋(1988—), 男, 河南焦作人, 博士生, 主要从事高超声速飞行器气动力与热辐射研究.

国内外对高超声速化学非平衡流场已经开展了较深入的研究,对高超声速流场的计算方法和计算格式作出了改进^[1-2],并研究了高超声速化学非平衡的磁流体动力学效应^[3]和热辐射效应^[4].但以上研究多以纯净空气作为化学反应组分,而在高超声速条件下,气动加热作用使得飞行器表面材料发生烧蚀,烧蚀产物又与空气发生复杂的化学反应,对流场特性产生很大影响.通常烧蚀材料中都含有极易电离的碱金属和碱土金属等杂质^[5],极大地增加了流场的电离度.碱金属杂质的加入使得烧蚀流场更为复杂,在以往对烧蚀流场的数值研究中,往往对问题进行了简化,建立的模型不考虑碱金属杂质的影响^[6-11].

本文建立含碱金属杂质的化学非平衡流动数值计算模型,模拟包括烧蚀反应等复杂物理现象的高超声速绕流流场,通过 Newton 迭代的空间推进方法求解流体和化学反应全耦合方程,计算得到流场温度、压力和电子数密度等特性分布.

1 数值模拟方法

为了模拟化学非平衡的烧蚀流场,本文在全流场区域建立抛物化 N-S 方程(PNS),将流体方程与化学方程同步耦合求解,耦合方法采用 Newton 迭代的空间推进方法.流场控制方程及求解算法与文献[12]类似,本文重点给出了化学反应模型和壁面边界条件的确定方法.

1.1 化学反应模型

结合所研究的大气背景条件,本文采用 7 组分(N, O, N₂, O₂, NO, NO⁺, e⁻)的高温空气模型,空气流场的化学反应参考 Park 等提出的模型^[13].以黏胶基碳布-酚醛树脂为例^[5],在考虑了烧蚀材料中碱金属杂质 Na 的影响后,烧蚀流场计算时采用 18 组分(N, O, N₂, O₂, NO, NO⁺, e⁻, CO₂, CO, C, C₂, C₃, CN, H₂, H, C₂H, Na, Na⁺) 33 个反应的化学反应模型,化学反应式见表 1.

正逆反应速率常数分别采用以下形式:

$$\begin{aligned} k_{fi} &= A_{fi} T_{fi}^{B_{fi}} \exp(-C_{fi}/T_{fi}) \\ k_{bi} &= A_{bi} T_{bi}^{B_{bi}} \exp(-C_{bi}/T_{bi}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N_r$; N_r 为化学反应的个数;系数 $A_{fi}, B_{fi}, C_{fi}, A_{bi}, B_{bi}, C_{bi}$ 见参考文献[14-15]; T_{fi}, T_{bi} 分别表示正向、逆向化学反应的控制温度.

1.2 壁面边界条件

在本文中,提出一种基于表面局部化学平衡的方法来分析壁面的烧蚀作用,通过质量平衡和

表 1 烧蚀流场化学反应式

Table 1 Chemical reactions of ablation flow field

序号	反应式	序号	反应式
1	$O_2 + M_1 \rightleftharpoons O + O + M_1$	18	$CO + C_2 \rightleftharpoons O + C_3$
2	$O_2 + O \rightleftharpoons O + O + O$	19	$C_2 + M_5 \rightleftharpoons C + C + M_5$
3	$O_2 + O_2 \rightleftharpoons O + O + O_2$	20	$C_3 + M_5 \rightleftharpoons C_2 + C + M_5$
4	$O_2 + N_2 \rightleftharpoons O + O + N_2$	21	$C + C_3 \rightleftharpoons C_2 + C_2$
5	$N_2 + M_2 \rightleftharpoons N + N + M_2$	22	$O + CO \rightleftharpoons O_2 + C$
6	$N_2 + N \rightleftharpoons N + N + N$	23	$N + CO \rightleftharpoons NO + C$
7	$N_2 + N_2 \rightleftharpoons N + N + N_2$	24	$CN + M_5 \rightleftharpoons N + C + M_5$
8	$NO + M_3 \rightleftharpoons N + O + M_3$	25	$N_2 + C \rightleftharpoons N + CN$
9	$O + N_2 \rightleftharpoons N + NO$	26	$N + CO \rightleftharpoons O + CN$
10	$O + NO \rightleftharpoons N + O_2$	27	$N + CO_2 \rightleftharpoons O_2 + CN$
11	$O + N \rightleftharpoons NO^+ + e^-$	28	$N_2 + CO \rightleftharpoons NO + CN$
12	$CO_2 + M_1 \rightleftharpoons CO + O + M_1$	29	$CO + CO \rightleftharpoons CO_2 + C$
13	$CO_2 + O \rightleftharpoons CO + O_2$	30	$O + CN \rightleftharpoons NO + C$
14	$CO + M_5 \rightleftharpoons O + C + M_5$	31	$H_2 + M_6 \rightleftharpoons H + H + M_6$
15	$CO + NO \rightleftharpoons CO_2 + N$	32	$C_2H + H \rightleftharpoons C_2 + H_2$
16	$CO + CO \rightleftharpoons O_2 + C_2$	33	$Na + M_7 \rightleftharpoons Na^+ + M_7 + e^-$
17	$CO + C \rightleftharpoons O + C_2$		

能量平衡使得防热层与流场两个区域高度耦合.在计算烧蚀过程中为简化模型,只考虑防热层与流场之间各种热化学过程所引起的烧蚀材料的质量损失,忽略由于机械剥蚀和材料热应力等力学作用所引起质量损失,忽略流场中气体的辐射作用^[11],则烧蚀壁面的质量平衡和能量平衡方程为

$$\rho D_i \frac{\partial \omega_i}{\partial \eta} \Big|_w + \dot{m}_i = (\rho v)_w \omega_i \quad i = 1, \dots, N_c \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \eta} \Big|_w + \sum_i^{N_c} H_i \rho D_i \frac{\partial \omega_i}{\partial \eta} \Big|_w + \dot{m} H_s = (\rho v)_w H_w + \epsilon \sigma T^4 + q \quad (3)$$

式中 ρ 为密度, D_i 为组分 i 的扩散系数, ω_i 为组分 i 的质量分数, η 为壁面外法线方向坐标, $\dot{m}_i$ 为组分 i 的质量流量, v 为速度, N_c 为组分数量, λ 为热导率, H_i 为组分 i 的焓, $\dot{m}$ 表示总的质量流量, H_s 为原始材料的生成焓, H_w 为壁面总焓, ϵ 为材料的辐射系数, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数, q 为热流密度, 下标 w 表示壁面.

方程(2)为质量平衡方程,左边项表示第 i 种

组分流入表面的质量,与流场扩散相关;右边项表示第 i 种组分流出表面的质量,与防热层的烧蚀反应相关;源项 $\dot{m}_i$ 对于烧蚀产物为正值,对于烧蚀过程消耗的氧化组分为负值。

方程(3)为能量平衡方程,左边项表示流入壁面的热量,包括气体传导、扩散和表面运动产生的热量;右边项表示流出壁面的热量,包括表面烧蚀、表面辐射和材料热传导。

壁面总的质量流量为

$$\dot{m} = (\rho v)_w = \sum_i \dot{m}_i \quad (4)$$

在表面局部化学平衡假设下,就可以通过元素质量分数 ω_k 来表示壁面质量平衡,对方程(2)中各组分求和得到每个元素 k 的质量平衡方程

$$\sum_i \omega_{ik} \rho D_i \frac{\partial \omega_i}{\partial \eta} \bigg|_w + \dot{m} \omega_{ks} = \dot{m} \omega_{kt} \quad (5)$$

$$k = 1, \dots, N_{el}$$

式中 ω_{ik} 为组分 i 中第 k 个元素的质量分数, ω_{ks} 表示原始材料中第 k 个元素的质量分数, ω_{kt} 表示第 k 个元素总的质量分数, N_{el} 表示元素数量。

在壁面固体-气体交界上补充速度条件和零压力梯度条件

$$u = 0, \quad v = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} \bigg|_w = 0 \quad (7)$$

对质量平衡和能量平衡方程进行离散化并与流场方程联立迭代求解。

2 计算结果与分析

以小钝锥体为对象建立二维几何模型,锥体长为 3.6 m,底部直径为 1.6 m,流场计算的初始条件和边界条件为:高度 $H=40$ km,马赫数 $Ma=8$,雷诺数 $Re=500\,000$,流场进口静压 $p_m=105$ Pa,进口静温 $T_m=216$ K,流场出口静压为 $p_{out}=95$ Pa。计算网格采用非结构网格,对小钝锥体周围进行网格局部加密,网格数为 346 582 个。首先计算小钝锥体的壁面温度,并将计算结果与文献[10]比较,如图 1 所示,初步验证计算模型和方法的可靠性。

从图 1 中可以看出,本文计算结果与文献[10]计算结果一致,考虑热化学烧蚀得到的壁面温度比非烧蚀(纯空气)条件下得到的壁面温度高,这是因为在热化学烧蚀情况下,考虑了壁面的氧化反应和催化反应,反应生成 CO 、 CO_2 等产物

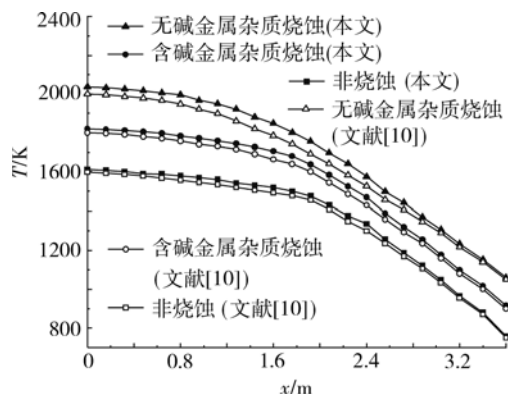
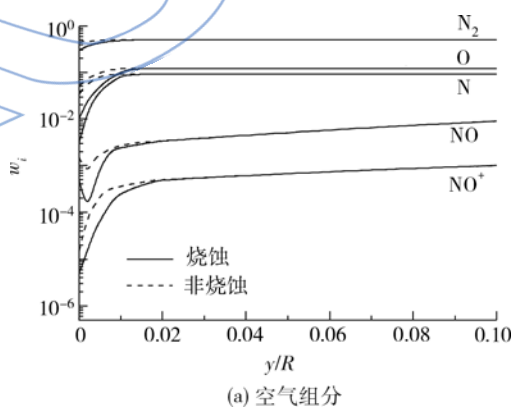


图1 壁面温度分布

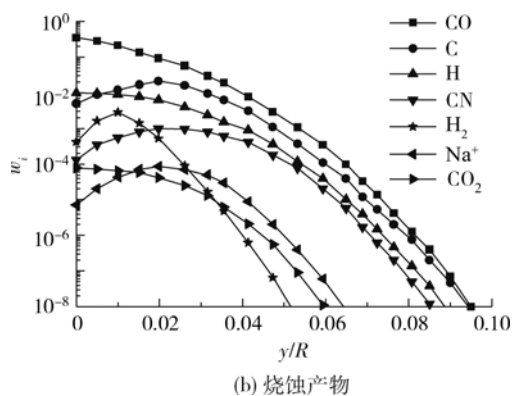
Fig. 1 Temperature distribution on wall

释放热量,而在非烧蚀情况下,只计算纯空气的反应没有这些反应产物。含碱金属杂质的烧蚀相对不含碱金属杂质的情况得到的壁面温度稍低,这是金属 Na 发生电离反应产生 Na^+ 的过程吸收热量所造成的。

图 2 给出了小钝锥体头部驻点线化学组分的质量分数(ω_i)分布, R 为底部半径。图 2(a)为空气组分的质量分数分布,可以看出热化学烧蚀使



(a) 空气组分

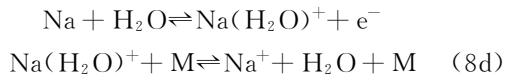
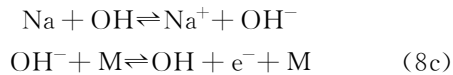
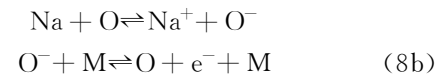
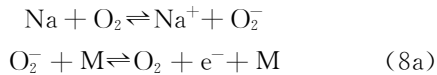


(b) 烧蚀产物

图2 头部驻点线化学组分质量分数分布

Fig. 2 Species mass fractions distribution along stagnation line of nose

得空气中 O, N, NO 和 NO^+ 组分质量分数降低, 这是因为烧蚀材料中的碳化层发生氧化反应和催化反应消耗了氧原子(O)和氮原子(N), 进而又使得产生的 NO 和 NO^+ 组分质量分数降低. 从图 2(b)中可以看出黏胶基碳布-氨酚醛树脂的烧蚀产物主要为 CO, H, H_2 和 Na^+ . 其中 CO 是由烧蚀材料中的碳化层发生氧化反应产生, H_2 由烧蚀材料发生热解反应产生, Na^+ 由碱金属杂质 Na 发生电离反应产生. 表 1 中第 33 反应式所示的 Na 的电离反应具体包括以下 4 个反应机制:



其中前 3 个反应式为 Na 电离反应的主要机制.

图 3 给出烧蚀和非烧蚀两种条件下小钝锥体流场的温度云图, 计算的尾流长度为从底部开始到 30 倍的底部半径 ($x=30R$). 由图可以看出化学烧蚀提高了流场温度, 并且小钝锥体壁面周围的温度比尾流部分提高程度大, 这是由于烧蚀反应产生的热量所致. 图 4 为流场的压力等值线, 由

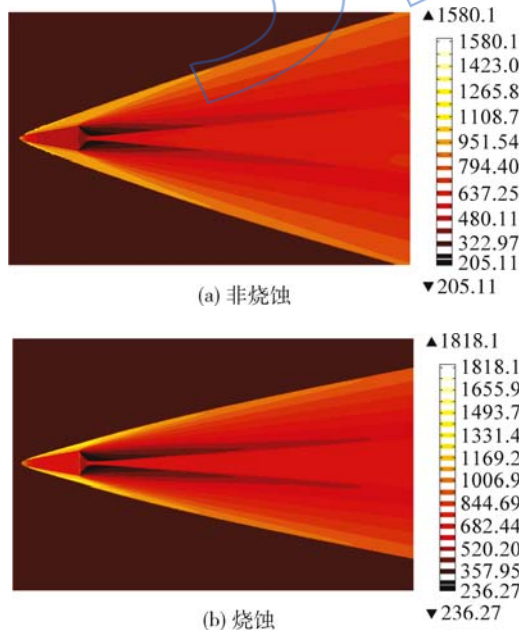


图 3 小钝锥体流场温度分布 (单位:K)

Fig. 3 Temperature distribution of small blunt cone flow field (unit:K)

图可知化学烧蚀对流场压力影响不大.

图 5 给出了含碱金属杂质烧蚀、不含碱金属杂质烧蚀和非烧蚀 3 种条件下流场轴向峰值电子数密度 n 的分布, 由图可得含碱金属杂质的烧蚀流场比非烧蚀条件计算得到的电子数密度低, 这是因为不含碱金属杂质的流场电子数密度取决于 NO^+ 组分的质量分数, 而烧蚀材料发生的氧化反应和催化反应消耗了氧原子, 减小了流场中 NO^+ 组分的质量分数, 从而降低了流场电子数密度. 由图还可以看出含碱金属的烧蚀流场比非烧蚀条件下得到的电子数密度高 1~2 个数量级, 这是因为对于含碱金属杂质的烧蚀流场, 其电子数密度主要由 Na^+ 控制, NO^+ 对电子数密度的影响

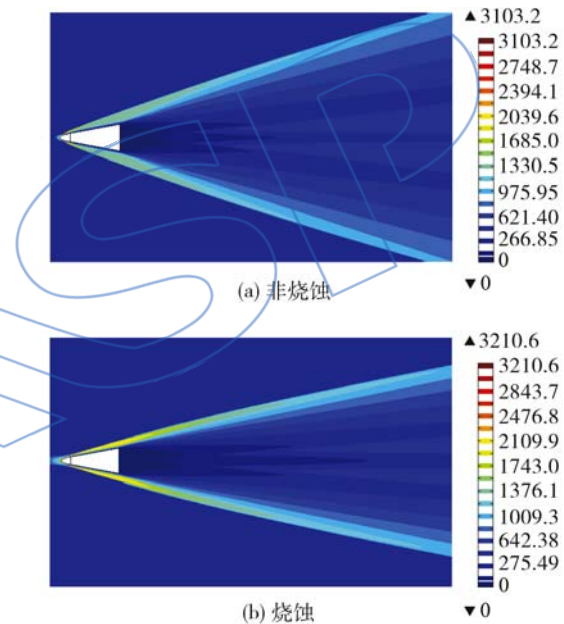


图 4 小钝锥体流场压力等值线 (单位:Pa)

Fig. 4 Pressure contours of small blunt cone flow field (unit:Pa)

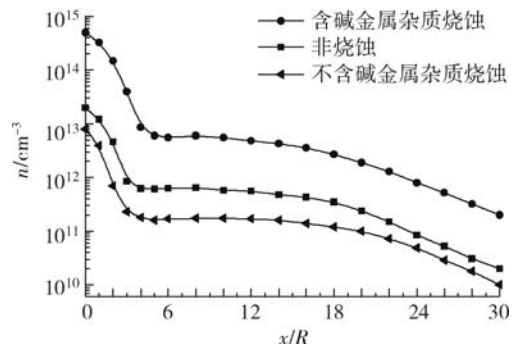


图 5 流场轴向峰值电子数密度分布

Fig. 5 Distribution of peak electron number densities along axial flow field

相对较小,因此在含碱金属杂质烧蚀条件下得到的流场电子数密度比非烧蚀情况显著增大。

3 结 论

本文以小钝锥体为研究对象,建立了含碱金属杂质的高超声速烧蚀流场模型,考虑了黏胶基碳布-氨酚醛树脂材料的氧化反应和壁面催化反应,分析了碱金属杂质 Na 的电离反应机制。通过对高超声速烧蚀流场特性的分析,得到以下结论:

1) 黏胶基碳布-氨酚醛树脂的烧蚀产物主要为 CO, H, H₂ 和 Na⁺ 等组分,热化学烧蚀反应使得流场温度较非烧蚀情况增加。

2) 对于不含碱金属杂质的烧蚀流场,NO⁺ 是影响电子数密度分布的主要机制,烧蚀中的氧化反应和催化反应使得流场中的电子数密度降低。

3) 对于含碱金属杂质的烧蚀流场,碱金属杂质 Na 发生的电离反应同时产生了 Na⁺ 和 e⁻, Na⁺ 成为影响流场电子数密度分布的主要机制,使得流场电子数密度显著增大。

参考文献:

- [1] 刘建新,禹旻,罗纪生. 抛物化 Navier-Stokes 方程在求解高超声速流动稳定性分析的基本流中的应用[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 984-990.
LIU Jianxin, YU Min, LUO Jisheng. Application of parabolized Navier-Stokes equations into basic flows for stability analysis of hypersonic flows[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 984-990. (in Chinese)
- [2] 周禹,阎超. 高超声速热化学非平衡空间格式的扩展与改进[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(2): 193-197.
ZHOU Yu, YAN Chao. Extension and improvement for schemes in hypersonic thermal and chemical non-equilibrium flows[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(2): 193-197. (in Chinese)
- [3] 黄富来,黄护林. 高超声速化学非平衡流动 MHD 效应的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(11): 1946-1948.
HUANG Fulai, HUANG Hulin. Numerical simulation of MHD effects on hypersonic chemical nonequilibrium flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(11): 1946-1948. (in Chinese)
- [4] 高铁锁,董维中,江涛,等. 高超声速钝头双锥体高温流场辐射研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(4): 410-413.
GAO Tiesuo, DONG Weizhong, JIANG Tao, et al. Radiative characteristics of flow over a hypersonic blunt double-cone body[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(4): 410-413. (in Chinese)
- [5] 李森茂. 烧蚀材料中碱金属和碱土金属含量的原子吸收测试方法的研究[R]. 北京: 航天材料及工艺研究所, 中国国防科学技术报告, 1991.
- [6] 李海燕,罗万清,石卫波. Newton 型迭代法在求解烧蚀边界条件控制方程中的应用[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(4): 456-461.
LI Haiyan, LUO Wanqing, SHI Weibo. An application of Newton-type iteration method on the control equations of ablation boundary[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(4): 456-461. (in Chinese)
- [7] 陆海波,陈伟芳,袁雷,等. 再入体碳基材料烧蚀特性分析与工程计算[J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 107-110.
LU Haibo, CHEN Weifang, YUAN Lei, et al. Ablation analysis and engineering calculation on carbon-based material of reentry vehicles[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 107-110. (in Chinese)
- [8] 何开锋,高铁锁,江涛. 烧蚀对再入体绕流电子数密度影响的数值研究[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(1): 57-61.
HE Kaifeng, GAO Tiesuo, JIANG Tao. Numerical study for the effects of ablation on electron number densities of flow over reentry vehicles[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27(1): 57-61. (in Chinese)
- [9] 高铁锁,董维中,张巧芸. 高超声速再入体烧蚀流场计算分析[J]. 空气动力学学报, 2006, 24(1): 41-45.
GAO Tiesuo, DONG Weizhong, ZHANG Qiaoyun. The computation and analysis for the hypersonic flow over reentry vehicles with ablation[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27(1): 57-61. (in Chinese)
- [10] 杨云军,马汉东,周伟江. 烧蚀外形转换流动的数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2005, 23(2): 248-252.
YANG Yunjun, MA Handong, ZHOU Weijiang. Numerical simulation on transitional flows around ablated configuration[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2005, 23(2): 248-252. (in Chinese)
- [11] Daniele B, Francesco N, Emanuele M. Navier-Stokes simulations of hypersonic flows with coupled graphite ablation[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2010, 47(4): 554-562.
- [12] Prabhu D K, Tannehill J C, Marvin J G. A new PNS code for chemical nonequilibrium flows[R]. AIAA 87-0248, 1987.
- [13] Park C, Jaffe R L, Partridge H. Chemical-kinetic parameters of hyperbolic earth entry[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2001, 15(1): 76-90.
- [14] Blottner F G. Prediction of electron density in the boundary layer on entry vehicles with ablation[R]. NASA N71-21113, 1971.
- [15] Langan W T, Cresswell J D, Browne W G. Effects of ablation products on ionization in hypersonic wakes[J]. AIAA Journal, 1965, 3(12): 2211-2218.