

电离对高超声速稀薄流飞行器气动热影响

屈 程, 王江峰

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 将电离反应模型扩展到(direct simulation Monte Carlo, DSMC)方法中,研究了电离反应效应对高超声速稀薄流飞行器气动热的影响特性. 针对稀薄流场中电子出现带来的实际困难,引入“捆绑法”思想处理电子在流场中的运动,并给出了电离反应模型及电离反应处理方法. 在以 RAM-C II 飞行器外形为例对增加了电离反应的 DSMC 代码进行验证的基础上,以“星尘号”探测器外形为研究对象,针对不同飞行高度下 5 组元混合气体模型(无电离)和 11 组元混合气体模型(含电离)的化学非平衡流动开展了数值模拟,细致分析和对比了电离反应效应对探测器气动热的影响规律. 研究表明:采用的电离反应处理方案能够模拟带电电离反应的高超声速化学非平衡稀薄流动. 在飞行高度为 60 km 时电离反应对探测器气动热的影响最为强烈,使探测器的驻点热流密度降低了 5.12%,电离反应对探测器气动热的影响随气体稀薄程度增加而减弱.

关 键 词: 气动热; DSMC 方法; 电离反应; 高超声速; 稀薄流

中图分类号: V19; V211

文献标志码: A

Ionization effects on aerodynamic heat for vehicle in hypersonic rarefied flow

QU Cheng, WANG Jiang-feng

(College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Effect of ionization reaction on aerodynamic heat characteristics for vehicle in hypersonic rarefied flow was studied by using direct simulation Monte Carlo (DSMC) method in which ionization reaction model was added. For the actual difficulties added by electron in rarefied flow, a bundling method was used to deal with electron motion. The ionization reaction model and the processing method of ionization reaction were presented. Firstly, taking the example of shape of RAM-C II vehicle, DSMC code with addition of ionization reaction was validated. Then, a numerical experiment was made to investigate the effects of ionization reaction on aerodynamic heat characteristics of the Stardust blunt body at different altitudes by use of 5 species gas model (without ionization) and 11 species gas model (with ionization) in chemical non-equilibrium flow. The results show that the treatment scheme proposed can simulate ionization reaction for hypersonic rarefied flow. At 60km altitude, ionization reaction effect on the aerodynamic heat characteristics becomes the strongest, reducing heat flux at stagnation point by 5.12%, and the effect decreases with the increase of the rarefied content of gas.

Key words: aerodynamic heat; DSMC method; ionization reaction; hypersonic; rarefied flow

收稿日期: 2015-09-21

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 屈程(1988—),男,江苏泰兴人,博士生,主要从事高超声速稀薄流 DSMC 气动热研究.

随着全世界科技和军事水平的不断发展,对高超声速飞行的研究已经成为了航空航天技术最前沿的阵地.当飞行速度为 7 km/s 左右时,由于飞行器和周围流场的剧烈相互作用,飞行器头部的温度将会达到数万开尔文,在如此高温条件下,飞行器头部区域内必然会发生电离反应,并伴随着热力学能和化学能之间的相互转换,此种能量的转化会对飞行器的气动热产生影响.

为了研究电离反应对飞行器气动热的影响,首先需要对现有未考虑电离反应的数值方法和模拟程序进行扩充,使其能够模拟流场中真实发生的电离反应.在稀薄流域,国内外学者普遍采用的是 Bird 于 1963 年发展的 DSMC 方法^[1-2].该方法有广泛的适应性,既能模拟无电离反应的流动又能模拟有电离反应发生的流动. Bird 和 Boyd 等人开始尝试在该方法中加入电离反应,模拟飞行速度接近 10 km/s 条件下稀薄流场中的电离^[3-4],但由于受当时计算机内存和速度的限制,整个流场中模拟带电粒子数太少,统计误差严重.在随后的几十年中,国际稀薄气体动力学几位著名学者都很关注稀薄流电离,对流场中电子运动的处理^[5]、双时间步长推进^[6]等方面开展了研究,取得了很多研究成果.国内在模拟稀薄流电离反应方面的研究相对较少,陈伟芳等人通过研究分子碰撞反应机理,在分子水平上对绝热封闭体系合并式电离-复合反应的弛豫过程进行了模拟^[7].樊菁等人提出了 trace species separation(TSS)方法,通过采用将主要组元和微量组元进行解耦计算的方式,实现了稀薄流场微量组元摩尔分布的求解^[8].

本文将电离反应模型耦合在文献[9-11]发展的 DSMC 方法中,实现了高超声速带电离反应的稀薄流模拟.首先采用 RAM-C II 外形算例对增加了电离反应的 DSMC 程序进行了算例验证,随后以星尘号探测器为研究对象,分别采用 5 组元($\text{N}_2, \text{O}_2, \text{NO}, \text{N}, \text{O}$)无电离混合气体模型和 11 组元($\text{N}_2, \text{O}_2, \text{NO}, \text{N}, \text{O}, \text{N}_2^+, \text{O}_2^+, \text{NO}^+, \text{N}^+, \text{O}^+, \text{e}$)含电离混合气体模型,对不同高度飞行状态进行了数值模拟,旨在研究高超声速稀薄流场中电离反应对星尘号探测器气动热的影响,为星尘号探测器的气动热防护设计提供技术支持.

1 计算方法

1.1 DSMC 方法介绍

DSMC 方法使用大量模拟分子模拟真实的

气体,用一个模拟分子代表一定数量的真实气体分子,该方法的本质是在时间步长 Δt 内,对分子的运动和分子间的碰撞进行解耦.整个模拟中分子之间以及分子和物面之间不断进行能量交换,在充足的模拟时间后,通过采样统计得到每个网格的宏观流场结果. DSMC 方法中,计算网格起两种作用^[12]:第 1 种是对流场宏观流动参数进行空间离散;第 2 种是促进碰撞分子碰撞对的选择,使其满足基本的几何接近.本文采用非结构贴体网格,计算中采用可变硬球(VHS)分子模型,利用非时间计数器(NTC)法进行碰撞对的选取,使用 Larsen-Borgnakke 唯象论模型处理模拟分子间的能量交换,采用恒温壁面边界条件,物面采用完全漫反射模型,流场采用单时间步长推进,非电离反应考虑离解、置换、复合 3 种类型^[2,13].

1.2 电离反应模拟

稀薄流场中电子的出现会为 DSMC 计算带来一系列困难,由于电子的质量比正常的重型粒子轻 5 个量级左右,如果所有粒子保持相同的平动温度,就会导致其热运动速度比重型粒子高出大约 2 个量级. DSMC 方法中粒子间的碰撞概率与粒子碰撞对的碰撞截面和相对运动速度值乘积成一定比例关系,如果粒子碰撞对中存在电子,那么该粒子碰撞对的相对运动速度值就会变得非常大,这就会导致有电子参与的粒子碰撞概率大大高于仅有重型粒子参与的粒子碰撞概率^[14-15].因此,在采用 DSMC 方法模拟存在电离反应的稀薄流场时,需要对流场中电子进行一定的特殊处理.

高空气体稀薄,流场电离程度通常较低^[1],本文在模拟流场电子运动时引入 Bird“捆绑法”的思想^[13,16-17],不允许电子在流场中独自移动,将电子和正离子保持在一个很近的距离内共同运动以满足流场整体的电中性.捆绑法处理方式从理解上相对简单,但是在实际程序处理中存在一定难度,核心是离子和电子在流场中的位置保持一致,当离子运动出研究区域时,电子也随之运动出研究区域,在程序中,电离反应后,要迅速地将电子和生成电子的离子捆绑在一起,并保证它们距离很近.

本文在模拟含电离反应的稀薄流场时采用以下几点假设^[17]:

- 1) 带电双原子粒子热力学松弛特性与相对应的电中性粒子一致;
- 2) 不考虑电子激发能激发过程及电子能级

跃迁过程;

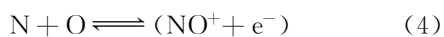
3) 不考虑热辐射效应及流场/电场耦合作用.

Total collision energy(TCE)模型是 DSMC 方法中较为广泛采用的化学反应模型^[13],在本文中,电离反应和其他非电离反应均采用该模型,此模型中化学反应速率可以表达为修改后的阿伦尼乌斯形式

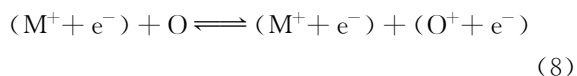
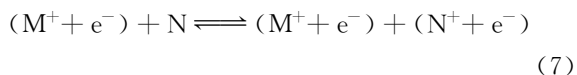
$$K(T) = AT^{\eta} \exp[-E_a/(kT)] \quad (1)$$

式中 $K(T)$ 为化学反应速率, A 为指数前因子, η 为温度指数, E_a 为活化能, k 为玻尔兹曼常数.

考虑的电离反应如下:



对于电离反应式(5)、式(6),本文参照文献[14]中处理方法对其作出修改



式中 M^+ 为带电正离子,既可以为单原子离子又可以为双原子离子.实际处理中,认为电子与正离子作为整体参与反应,反应过程中正离子 M^+ 的内能不发生改变,这样,化学反应能全部来自 $(M^+ + e^-)$ 和被激发分子的相对平动能.

1.3 算例验证

本文采用 RAM-C II 外形对建立的考虑电离反应数值模拟程序进行验证, RAM-C II 外形尺寸如图 1 所示,化学反应模型与计算条件取自文献[13],来流速度 $V_{\infty} = 7.8 \text{ km/s}$,高度 $H = 81 \text{ km}$,程序循环 80 000 步,其他计算参数见表 1.

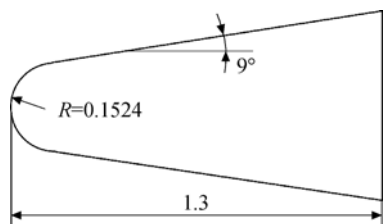


图1 RAM-C II 外形尺寸(单位:m)

Fig. 1 Dimensions of the RAM-C II configuration (unit:m)

表1 计算参数

Table 1 Parameters of calculation

参数	数值
T_{∞}/K	196.7
T_{surf}/K	1500
$\rho_{\infty}/10^{-5}(\text{kg/m}^3)$	1.575
x_{N_2}	0.79
x_{O_2}	0.21

注: x_{N_2} , x_{O_2} 分别代表 N_2 和 O_2 的摩尔分数; T_{∞} , ρ_{∞} 分别为来流温度和来流密度; T_{surf} 为飞行器物面温度.

图 2 给出了沿驻点线 3 种模式温度分布与文献[13]的对比,基本相符,仔细观察可以发现本文 3 种模式温度分布比文献[13]结果略高.另外从图 2 可以看出显著的热力学非平衡现象,气体经过激波被快速压缩和加热,使得气体分子发生离解和电离等化学反应,并伴随着分子的振动以及束缚电子的激发,此时比定压热容和比定容热容变成温度的函数,完全气体假设不再成立,由于气体分子平动能的松弛速率高于内能松弛速率,因此气体吸收的能量最先供应给平动能,平动温度(T_t)在转动温度(T_r)和振动温度(T_v)之前开始上升,随着流动靠近物面,气体密度增加,分子碰撞频率增加,平动能和内能之间的能量交换加快,使气体分子的内能迅速增加,转动温度和振动温度也相继开始上升,最后平动、转动和振动温度在物面附近被强制平衡到物面温度.图 3 给出了沿驻点线几种组元的粒子数密度分布与文献[13]的对比,观察图 3 可以发现本文氮和氧原子的数密度分布略低于文献[13]结果,这表明本文氮气和氧气离解程度比文献[13]略低,离解反应吸收的热力学能也略低,这与图 2 中 3 种模式温度分布略高于文献结果的现象相符.图 4 给出了沿驻点线氮气和主要带电组元的粒子数密度分布与文献[13]的对比,观察图 4 可以发现 3 种带电子沿驻点线离子数密度分布与文献结果略有偏差,本文在处理电离反应时认为电子能态若非处于基态则处于激发态,没有考虑电子能级跃迁过程^[17],采用相对平动能作为反应能进行电离反应发生判定,而文献[13]对于是否考虑电子能级跃迁过程以及电离反应能的选取方式并未作明确说明,虽然采用本文处理方法得到的带电粒子数密度分布与文献[13]结果略有差异,但趋势相同,流场电离程度非常低,带电子中一氧化氮离子的含量相对较高,氮气离子的含量相对最低.

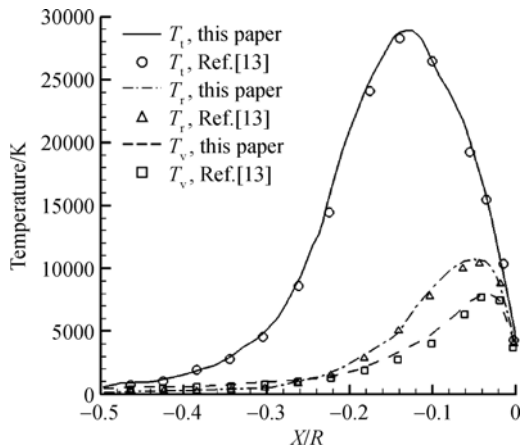


图 2 温度沿驻点线分布对比

Fig. 2 Comparison of temperature distribution along the stagnation line

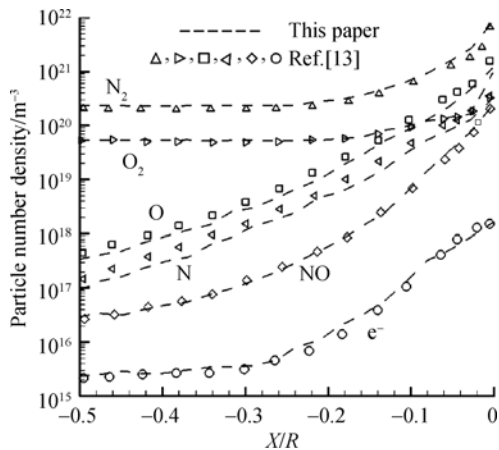


图 3 几种组元沿驻点线的粒子数密度对比

Fig. 3 Comparison of particle number density of different species along the stagnation line

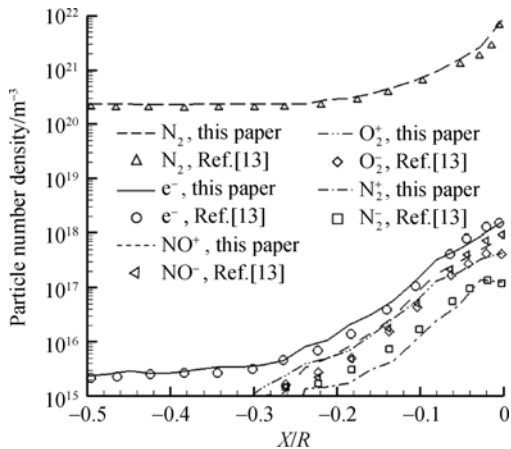


图 4 氮气和主要带电组元沿驻点线粒子数密度对比

Fig. 4 Comparison of particle number density of nitrogen and major electriferous species along the stagnation line

2 电离反应对高超声速稀薄流飞行器气动热影响计算

星尘号探测器是进入大气层最快的人造宇宙飞行器,再入速度达到 12.8 km/s,在此速度下,探测器头部区域温度足以满足电离反应的发生.本文以星尘号探测器外形为研究对象,分别采用 5 组元混合气体模型(无电离)、11 组元混合气体模型(含电离)对星尘号探测器高超声速稀薄流绕流进行了数值模拟分析.星尘号探测器外形尺寸如图 5 所示,来流速度 $V_\infty=12.8$ km/s,程序循环 100 000 步,不同高度(H)下计算参数见表 2.

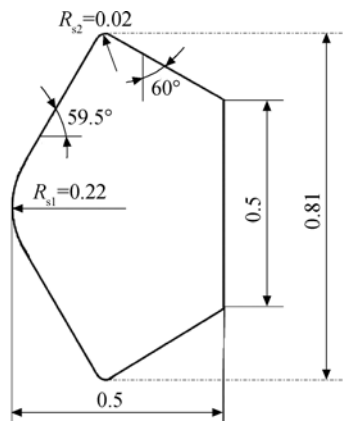


图 5 星尘号探测器外形尺寸(单位:m)

Fig. 5 Dimensions of the Stardust configuration (unit:m)

表 2 不同高度下计算参数

Table 2 Parameters of calculation with different altitudes

$H/$ km	$T_\infty/$ K	$T_{\text{surf}}/$ K	$\rho_\infty/10^{-5}$ (kg/m ³)	x_{N_2}	x_{O_2}
60	247	1000	30.970	0.7589	0.2411
70	219	1000	8.283	0.7600	0.2400
80	185	1000	2.002	0.7900	0.2100

图 6 为星尘号探测器在 80 km 高度采用 11 组元混合气体模型时的流场密度等值线及云图分布.从图中可以发现,由于受高空稀薄气体效应的影响,探测器头部激波过渡区比较大,迎风区激波后气体密度增加,背风区气体密度非常小,接近真空.图 7 给出了相同计算条件下流场电子数密度等值线及云图分布.观察图 7 可以发现,流场中的电子主要产生于激波至壁面区域,在该计算条件下,流场中电子数密度的最大值为 5×10^{20} 个/m³.

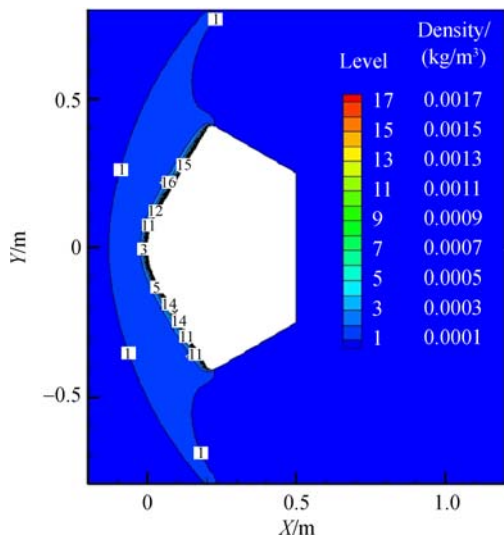
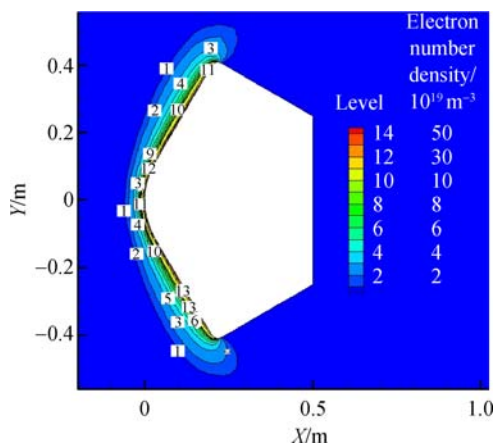
图6 密度等值线及云图($H=80\text{ km}$, 11组元)Fig. 6 Isolines and contours of density
($H=80\text{ km}$, 11 species)图7 电子数密度等值线及云图($H=80\text{ km}$, 11组元)Fig. 7 Isolines and contours of electron number density
($H=80\text{ km}$, 11 species)

图8为星尘号探测器在70,80 km高度采用11组元混合气体模型计算的氮气、氧气和电子的粒子数密度沿驻点线分布,观察图8(a)、图8(b)可以发现流场中电离反应主要发生在激波至壁面区域,激波后由于流场中的温度很高,氮气和氧气离解程度加剧,靠近壁面又由于冷壁效应致使氮气与氧气粒子数密度增加.对比图8(a)、图8(b)可以发现在激波至壁面区域,70 km高度流场中氮气和氧气离解程度比80 km高度流场更为剧烈,同时70 km高度流场电离程度更高,本文采用带电粒子数密度占总粒子数密度的百分比反映流场的电离程度,70 km高度探测器驻点区域电离程度为6.7%;80 km高度为2.8%.这主要是由

于飞行高度越低,气体稀薄程度越低,粒子间的碰撞频率越高,能量交换越为充分,化学反应也越剧烈.

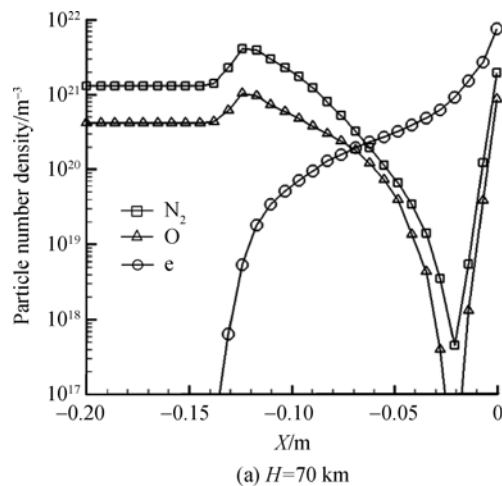
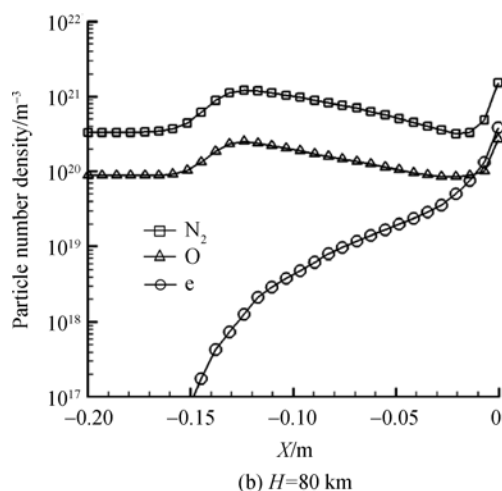
(a) $H=70\text{ km}$ (b) $H=80\text{ km}$

图8 氮气、氧气和电子沿驻点线粒子数密度(11组元)

Fig. 8 Particle number density of nitrogen, oxygen and electron along the stagnation line (11 species)

图9给出了60 km高度分别采用5组元混合气体模型与采用11组元混合气体模型所得流场总温云图,从中可以看出,采用5组元混合气体模型与采用11组元混合气体模型下的激波位置存在差别,后者的激波离壁面的距离更近,并且其流场总温比前者低了约2000 K. 上述差异主要是受电离反应的影响,对比高温空气中各种化学反应速率不难发现,电离反应的活化能整体高于非电离反应的活化能,特别是单原子分子的直接电离,活化能约为13 eV,明显高于一般非电离反应的活化能^[13,16],不仅如此,流场中双原子分子离解生成的单原子分子还可能继续吸收热量发生进一步电离,这会加剧热力学能向化学能的转化,致使流

场温度降低,当温度降低时,受热胀冷缩效应影响,气体分子的振动幅度便会减少,使得气体压缩性增强,因此激波更靠近壁面。

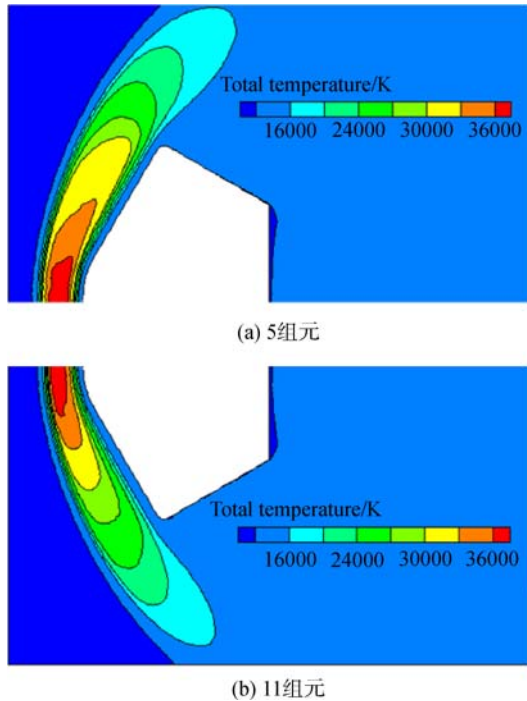


图9 5组元、11组元混合气体模型总温云图($H=60\text{ km}$)
Fig. 9 Contours of total temperature of 5 species and 11 species gas models ($H=60\text{ km}$)

图10为不同飞行高度下,分别采用5组元混合气体模型与采用11组元混合气体模型所得的驻点线平动温度分布。从图10可以发现,较高飞行高度处驻点线平动温度高于较低飞行高度处结果,该现象与文献[18]一致。这主要是由非平衡效应引起的,飞行高度越高时密度越低,粒子间碰撞频率越低,气体非平衡现象越显著,平动能量传递给内能较少,而在较低飞行高度较高密度情况下,粒子间碰撞频率较高,平动模式与内能模式之间的能量交换加快,气体趋于平衡,平动能量传递给内能较多。此外,观察图10(a)、图10(b)、图10(c)可以发现,随着飞行高度增加,电离反应对温度和激波位置的影响有减弱的趋势,在60 km高度时两者差异最大,在80 km高度时两者差异变得很小。这主要是因为飞行高度越高,气体稀薄程度越高,粒子间的碰撞频率越低,电离反应发生概率越小,电离反应引发的流场热力学能降低越不明显,对温度和激波位置的影响也越微弱。

图11给出了不同飞行高度下,分别采用5组元混合气体模型与采用11组元混合气体模型所

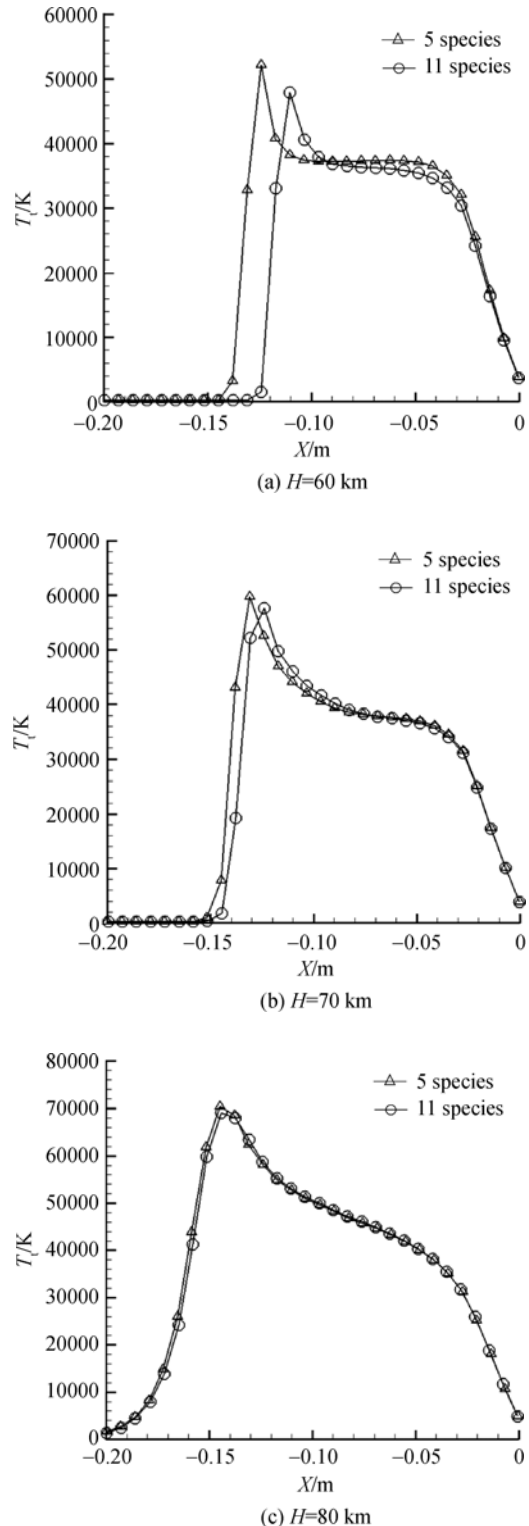


图10 不同高度5组元、11组元混合气体模型驻点线平动温度

Fig. 10 Translational temperature along the stagnation line of 5 species and 11 species gas models under different altitudes

得的壁面热流密度沿X轴线方向的分布,从中可以看出,在60 km高度时,采用11组元混合气体模型得到的壁面热流密度明显低于采用5组元混

合气体模型的结果,而在 80 km 高度时两者结果非常接近。

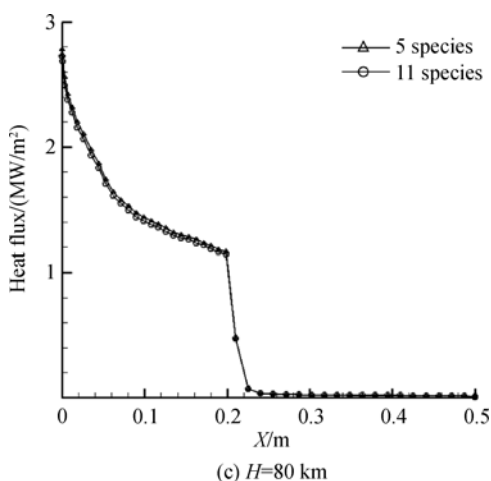
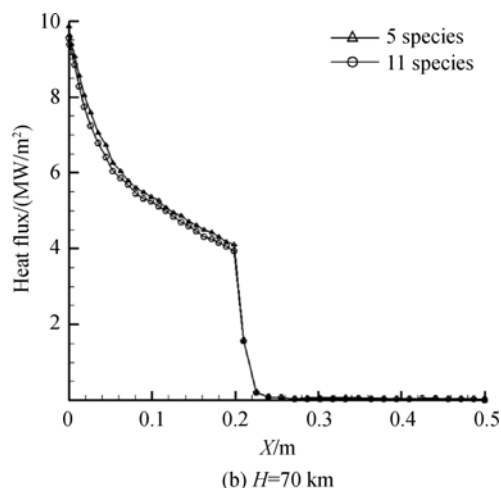
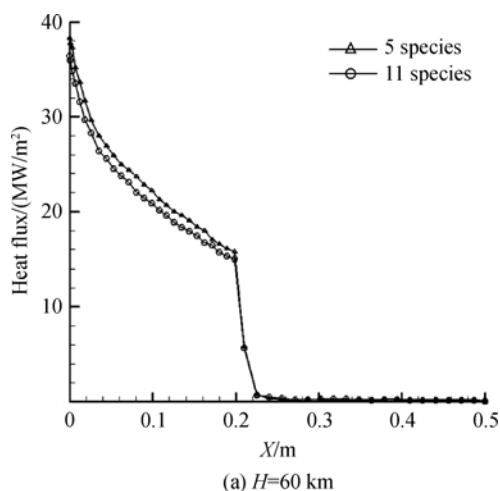


图 11 不同高度 5 组元、11 组元混合气体模型壁面热流密度

Fig. 11 Heat flux on the surface of 5 species and 11 species gas models under different altitudes

表 3 给出了不同飞行高度下,分别采用 5 组元混合气体模型与采用 11 组元混合气体模型所得的驻点热流密度(q_0)对比.观察表 3 可以发现,驻点热流密度结果最大偏差出现在 60 km 高度,电离反应使驻点热流密度值降低了 5.12%;在 70 km 高度,电离反应使驻点热流密度值降低了 3.14%;80 km 高度驻点热流密度相对误差最小,仅为 2.16%。

表 3 不同高度 5 组元、11 组元混合气体模型驻点热流密度对比

Table 3 Heat flux at stagnation point of 5 species and 11 species gas models under different altitudes

H/km	$q_0/(\text{MW}/\text{m}^2)$		$\Delta q_0/(\text{MW}/\text{m}^2)$	相对误差/%
	5 组元	11 组元		
60	38.3	36.4	1.90	-5.12
70	9.87	9.56	0.31	-3.14
80	2.78	2.72	0.06	-2.16

3 结 论

本文引入“捆绑法”电子运动处理思想将电离反应耦合在现有 DSMC 方法中,计算并分析了电离反应对高超声速稀薄流飞行器气动热的影响,主要结论如下:

1) RAM-C II 验证算例表明本文采用的电离反应处理方案可行并且能够模拟带电离反应的高超声速稀薄流化学非平衡流动。

2) 高超声速稀薄流场中发生的电离反应会降低飞行器气动热模拟结果,并且飞行高度越高,气体稀薄程度越高,电离反应对气动热的影响越弱.本文计算的 3 个飞行高度下,60 km 高度气体稀薄程度最低,电离反应对星尘号探测器气动热的影响最为强烈,流场温度及壁面热流密度结果明显降低,驻点热流密度结果降低了 5.12%;80 km 高度气体稀薄程度最高,电离反应对探测器气动热影响最弱,驻点热流密度结果降低了 2.16%。

本文在模拟稀薄流电离时认为流场满足整体电中性,没有考虑流场/电场耦合作用,但随着飞行高度降低,气体稀薄程度降低,流场电离程度会加剧,终将不满足整体电中性,对此,将做更进一步研究。

参考文献:

- [1] 沈青. 稀薄气体动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

- [2] Bird G A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flow[M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1994.
- [3] Bird G A. Nonequilibrium radiation during re-entry at 10 km/s[R]. AIAA 87-1543, 1987.
- [4] Boyd I D, Gokcen T. Computation of axisymmetric and ionized hypersonic flows using particle and continuum method[J]. AIAA Journal, 1994, 32(9): 1828-1835.
- [5] Boyd I D. Computation of hypersonic flows using the direct simulation Monte Carlo method[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 52(1): 38-53.
- [6] Hoult D, Starkey R P, Lewis M J. DSMC of power-law leading edge ionization for hypersonic telemetry applications[R]. AIAA-2003-6964, 2003.
- [7] 陈伟芳, 郑忠华, 任兵, 等. 合并式电离-复合反应的 DSMC 模拟[J]. 空气动力学学报, 1998, 16(3): 348-351.
CHEN Weifang, ZHENG Zhonghua, REN Bing, et al. DSMC simulation of associative ionization recombination reactions[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1998, 16(3): 348-351. (in Chinese)
- [8] 樊菁. 稀薄气体动力学: 进展与应用[J]. 力学进展, 2013, 43(2): 185-201.
FAN Jing. Rarefied gas dynamics: advances and applications[J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(2): 185-201. (in Chinese)
- [9] 王学德. 高超声速稀薄气流非结构网格 DSMC 及并行算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
WANG Xuede. DSMC method on unstructured grids for hypersonic rarefied gas flow and its parallelization[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [10] 屈程, 王江峰. DSMC 算法气体壁面相互作用模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(3): 348-354.
QU Cheng, WANG Jiangfeng. Gas-surface interaction models for DSMC method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 47(3): 348-354. (in Chinese)
- [11] QU Cheng, WANG Jiangfeng. Hybrid grid DSMC method for chemical nonequilibrium with rarefied flow heating[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 32(4): 409-414.
- [12] Gallis M A, Torczynski J R, Rader D J, et al. Convergence behavior of a new DSMC algorithm[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(12): 4532-4548.
- [13] Boyd I D. Modeling of associative ionization reactions in hypersonic rarefied flows[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(9): 3-14.
- [14] Farbar E D, Boyd I D. Simulation of reactions involving charged particles in hypersonic rarefied flows[R]. AIAA-2009-267, 2009.
- [15] Boyd I D. Modelling of the near field plume of a hall thruster[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(9): 4575-4584.
- [16] Bird G A. Direct simulation of typical AOTV entry flows[J]. AIAA 86-1310, 1986.
- [17] 吴其芬, 陈伟芳. 高温稀薄气体热化学非平衡流动的 DSMC 方法[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1999.
- [18] 石于中, 陈伟芳, 任兵, 等. 稀薄流热化学非平衡效应的 DSMC 研究[J]. 空气动力学学报, 1997, 15(2): 239-244.
SHI Yuzhong, CHEN Weifang, REN Bing, et al. DSMC study for the effects of thermochemical nonequilibrium in rarefied flow[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1997, 15(2): 239-244. (in Chinese)

(编辑: 陈越)