

文章编号: 1000-8055(2005) 02-0318-05

环境压强对电弧喷射推力器性能的影响

肖应超, 刘 宇, 张振鹏
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘要: 为了详细研究环境压强对电弧喷射推力器性能的影响, 对低功率氮氢电弧喷射推力器在不同环境压强下的工作性能进行了比较计算。采用二阶精度无波动、无自由参数的耗散差分格式(NND 格式) 和经典龙格库塔方法求解耦合电磁源项的N-S 方程组, 采用高斯-塞德尔超松弛迭代方法数值求解电磁场方程。计算结果给出了不同环境压强下推力器的推力、比冲、推进效率和出口平面冲量密度分布。结果分析定量地阐释了环境压强对推力器性能的影响, 能为推力器的实验研究及空间应用提供参考。

关键词: 航空、航天推进系统; 电弧喷射推力器; 数值模拟; 环境压强; 性能; 影响
中图分类号: V439 **文献标识码:** A

Influence of Environmental Pressure on Arcjet Thruster Performance

XIAO Ying-chao, LIU Yu, ZHANG Zhen-peng

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the influence of environmental pressure on arcjet thruster performance, computation of operating performance of a low power nitrogen/hydrogen arcjet thruster under various environmental pressures was performed. Non-oscillating and non-free-parameter dissipative finite difference scheme with second order accuracy and classical Runge-Kutta time-stepping scheme was used to solve Navier-Stokes equations coupled with electromagnetic source terms, and Gauss-Seidel over-relaxation iteration method was adopted to solve electromagnetic equation. The results present thrust, specific impulse and thrust efficiency of the thruster under various environmental pressures, as well as impulse density distribution on the exit plane. Analyses of the results demonstrate influence of the environmental pressure on arcjet thruster performance quantitatively, and provide reference for its experimental investigation and its space application.

Key words: aerospace propulsion system; arcjet thruster; numerical simulation; environmental pressure; performance; influence

收稿日期: 2004- 03- 18; 修订日期: 2004- 05- 13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50086001); 国防基础科研项目(K1201060711); 博士生创新性研究基金

作者简介: 肖应超(1979-), 男, 湖北孝感人, 北京航空航天大学宇航学院博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

低功率电弧喷射推力器(Arcjet)主要用于同步卫星的南北位置保持和控制、中低轨道卫星的入轨和离轨推进,是运行可靠、性能优良的空间电推力器。在空间应用和实验研究中环境压强都会有些变化,尤其是在实验条件下环境压强相对较高,变化也相对较大,对推力器性能影响较大。为了详细研究环境压强的变化对推力器性能的影响以及由此带来的实验性能与空间应用性能的差异,本文在建立 Arcjet 数值模型的基础上对低功率氮氢 Arcjet 在不同环境压强下的工作性能进行了比较计算,给出了不同环境压强下推力器的推力、比冲和推进效率,详细分析了环境压强的变化对其性能的影响,能为其实验研究和空间应用提供参考。

1 物理模型

由于Arcjet 工作过程物理机理极为复杂,全面考虑各种物理过程细节难度较大,为了简化计算模型假设 Arcjet 内部高温电离气体:(1)流动状态为轴对称粘性层流流动;(2)处于局域热力学平衡状态;(3)呈电准中性;(4)与电极之间没有热交换;(5)为光学薄等离子体;(6)没有以辐射的方式向外传递能量;(7)遵循理想气体状态方程;(8)电导率与温度呈分段线性关系。

模型以摩尔比3:2的氮气、氢气的混合气体作为推进剂,并且:(1)不考虑温度梯度引起的质量扩散效应;(2)不考虑电子压强梯度驱动下电子漂移对电流的贡献;(3)不考虑质量力的作用;(4)考虑洛伦兹力对动量的贡献;(5)考虑欧姆加热和磁流体功对能量的贡献。

2 数值方法

2.1 控制方程

基于以上物理模型 Arcjet 内部过程的数学模型可以用耦合电磁源项的二维轴对称 N-S 方程组来描述。由于耦合了电磁源项,要完全对控制方程进行无量纲化,电磁场参数的处理显得比较困难,这里采用其半无量纲形式:

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{r}} + \frac{\partial \tilde{E}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{F}}{\partial \tilde{y}} + \tilde{G} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tilde{E}_v}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{F}_v}{\partial \tilde{y}} + \tilde{H} \right) + A \cdot S$$

其中 $Re = \rho_{\infty} V_{\infty} L$, ρ_{∞} , V_{∞} 和 L 分别为密度参考量、速度参考量和长度参考量, S 为电磁源项, A 为对

方程进行半无量纲化时引入的电磁源项系数矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\infty} / \rho_{\infty} u_{\infty}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{\infty} / \rho_{\infty} u_{\infty}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{\infty} / \rho_{\infty} u_{\infty}^3 \end{bmatrix}$$
$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot \vec{i}_0 \\ (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot \vec{j}_0 \\ (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot \vec{V} + \vec{j} \cdot \vec{E} \end{bmatrix}$$

方程中除物性参数和电磁源项外的各参数均为无量纲参数,各参数形式和意义见参考文献[1, 2]。

2.2 N-S 方程组的数值解法

将以上半无量纲化控制方程转化到计算平面上进行数值求解,采用二阶精度 NND 格式完成对流项的离散^[2],采用二阶精度中心差分格式完成粘性项的离散,采用经典龙格库塔时间步进法^[3]求出稳态解。

2.3 电磁场方程的数值求解

对由麦克斯韦方程组简化得到的电磁场方程采用有限控制容积积分方法在计算平面上进行离散求解,采用高斯-塞德尔超松弛迭代方法求解离散得到的代数方程^[2]。

2.4 边界条件

(1) 流场边界条件:进口给定总压、总温、流动角及由特征相容关系得到的第4个补充边界条件;对于超声速出口外推4个流动参数,对于亚声速出口给定反压并外推3个流动参数;轴线上径向速度为零,外推3个流动参数;壁面无滑移,外推压强并给定温度分布。

(2) 电磁场边界条件:电磁场复合变量的值在阴极上除了尖端以外的表面和阳极表面喉部上游为按给定电流计算出的定值,并沿阳极壁面从喉部到出口线性减小到零;在阴极尖端与阴极尖端径向截面呈线性关系减小到零;在进口边界上为按给定电流计算出的定值;在出口边界和中心线上为零。

2.5 初始条件

流场初值由一维等熵流气体动力学公式计算给出并另行给定初始温度分布。

3 计算结果及分析

本文对以摩尔比为3：2的氮气、氢气混合气体作为推进剂的某低功率Arcjet在不同环境压强下的工作性能进行了计算,计算条件均为 $P_c=0.20\text{ MPa}$, $I=15.0\text{ A}$,其中 P_c 和 I 分别为入口总压和工作电流,计算结果见表1,其中 P_b 、 F 、 I_{sp} 和 η_k 分别为环境压强、推力、比冲和推进效率。表1中的结果表明:当推力器工作环境真空度很高时,环境压强及其变化很小,环境压强对推力器推力、比冲以及推进效率的影响非常小,而推力器空间应用环境真空度极高,由于轨道高度变化引起的环境压强变化极小,完全可以不考虑其对推力器推力、比冲以及推进效率的影响;当环境压强变化较大时,它对推力器推力、比冲以及推进效率影响比较大。与0.01 Pa时的结果相比,环境压强为120.0 Pa时推力器的

比冲低3.20%,推进效率低7.42%;与30.0 Pa时的结果相比,环境压强为120.0 Pa时推力器的比冲低2.12%,推进效率低5.81%。在实验条件下环境压强及其变化较大,需要考虑其对推力器性能的影响及推力器实验性能与空间应用性能的差异。文献[4]对以摩尔比为1：2的氮气、氢气混合气体为推进剂的低功率Arcjet进行了实验研究,典型实验结果见表2(P 为入口室压),与本文计算结果有一定的对比性,证实了本文模型和数值计算方法的有效性,及计算结果的合理性,两者存在差异的原因有:(1)推进剂不同;(2)推力器的结构尺寸和工作条件不尽相同;(3)数值模型还不太完善且没有考虑推力器与环境之间的热交换,而实际上推力器与环境之间的热交换与环境压强紧密相关,环境压强对推力器性能的影响比数值模拟结果要大;(4)实验结果

表1 不同环境压强下的计算工作性能

Table 1 Computational operating performance under various environmental pressures

P_b/Pa	0.01	0.10	1.00	10.0	30.0	50.0	120.0
$F/(\text{mN})$	188.15	188.14	188.10	187.76	186.98	186.20	179.92
$I_{sp}/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{Kg})$	4982.9	4982.7	4981.1	4964.6	4928.3	4892.4	4823.6
$\eta_k/(\%)$	37.439	37.434	37.415	37.223	36.799	36.380	34.660

表2 文献[4]中的实验结果

Table 2 Experimental results from reference [4]

P/MPa	I/A	F/mN	$I_{sp}/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{Kg})$	$\eta_k/(\%)$	P_b/Pa
0.253	14.0	165	4 527.6	27.3	15.7
0.259	14.0	174	4 792.2	30.2	0.15

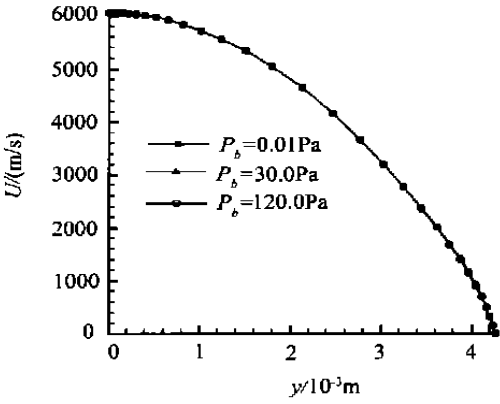
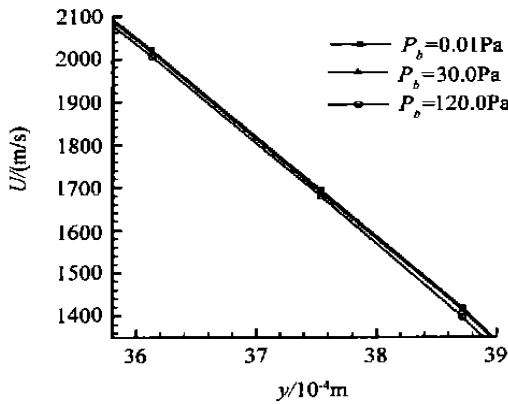


图1 出口平面上的轴向速度分布

Fig. 1 Axial velocity distribution on exit plane

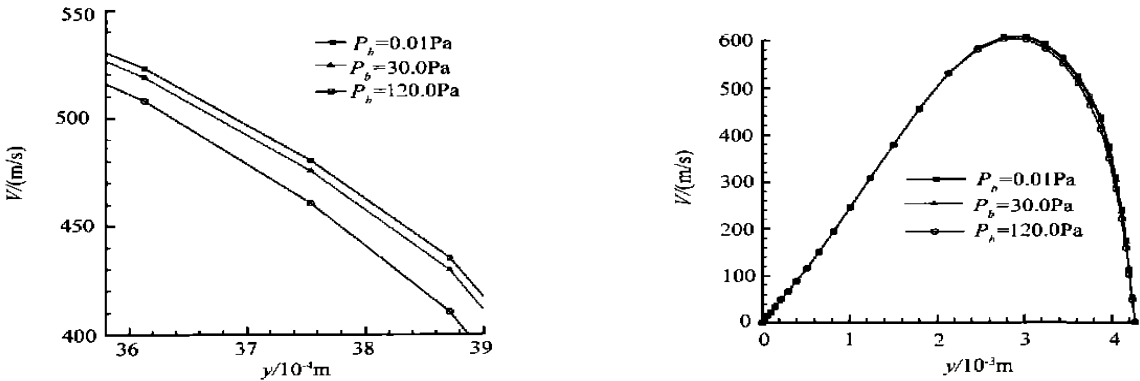


图2 出口平面上的径向速度分布
Fig. 2 Radial velocity distribution on exit plane

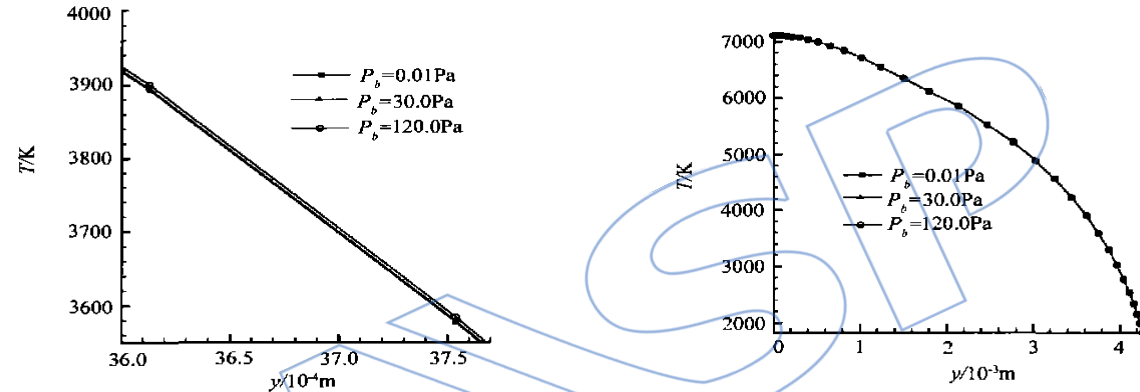


图3 出口平面上的温度分布
Fig. 3 Temperature distribution on exit plane

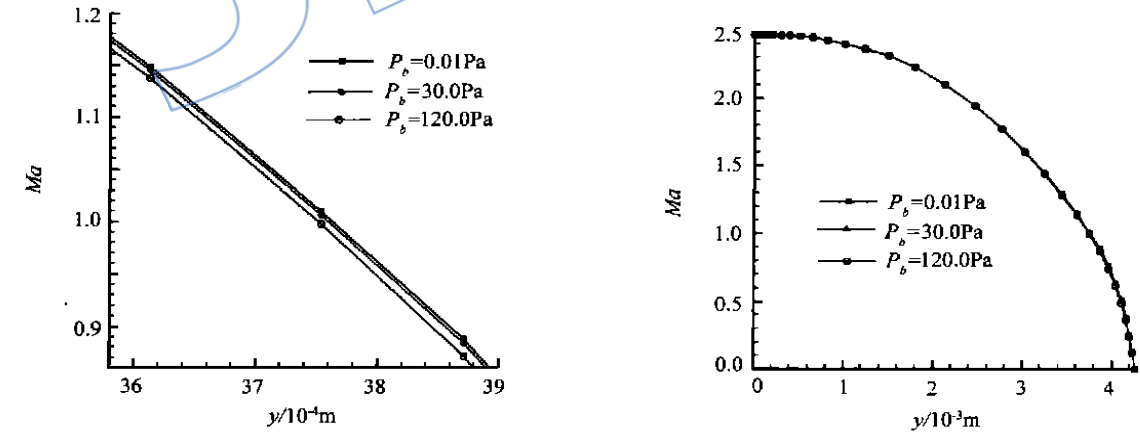


图4 出口平面上的马赫数分布
Fig. 4 Mach number distribution on exit plane

测量也存在一定误差。

本文计算出口平面参数分布表明: 环境压强在喷管出口作用于亚声速区, 进而影响着整个喷管流动过程, 在宏观上影响着推力器的性能。随着环境压强的增加, 其对喷管出口亚声速区的压缩作用增加, 使得在喷管出口相同的位置上轴向速度和径向速度均减小(见图 1 和图 2), 而在除壁面附近以外的位置上温度增加(见图 3), 因此在

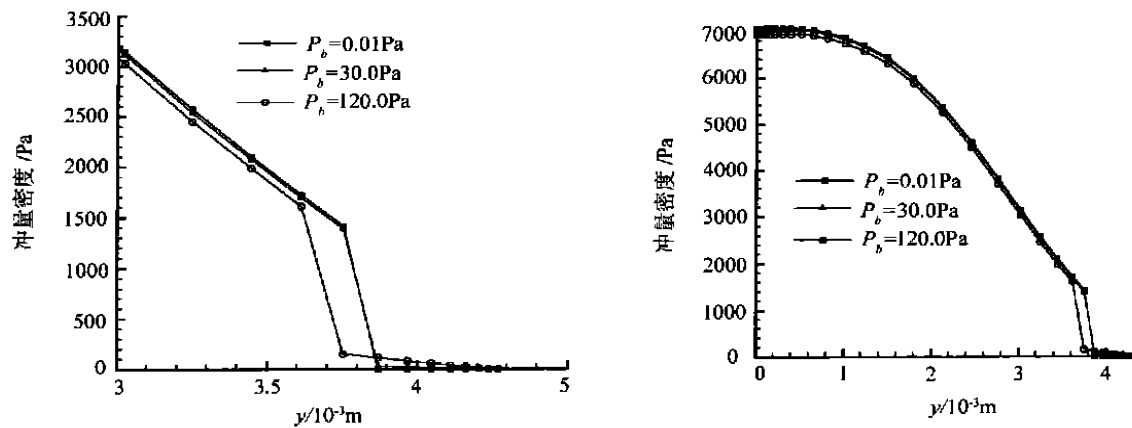


图5 出口平面上的冲量密度分布

Fig. 5 Impulse density distribution on exit plane

喷管出口相同的位置上马赫数减小, 而亚声速区厚度增加(见图4), 超声速区冲量密度减小, 亚声速区冲量密度增加(见图5), 但由于亚声速区厚度小得多, 在宏观性能上推力器的推力和比冲均减小(见表1)。

4 结 论

本文在适当的假设前提下建立了Arcjet 工作过程的数值模型, 并对某低功率氮氢Arcjet 在不同环境压强下的工作性能进行了比较计算。计算结果表明, 由于空间环境的真空度很高, 在空间应用中完全可以不考虑由于轨道变化带来的环境压强的变化对Arcjet 性能的影响, 而在实验条件下由于环境压强及其变化均较大, 需要考虑其对Arcjet 性能的影响, 通过实验来预计Arcjet 空间应用性能时应

考虑实验性能与空间应用性能的差异。本文计算结果与国外相关研究成果具有较好的对比性, 能够为Arcjet 空间应用和实验研究提供一定的参考。

参考文献:

[1] 刘导治. 计算流体力学基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.

[2] 肖应超, 刘宇, 张国舟. 低功率氩电弧喷射推力器中的辐射[J]. 航空动力学报, 2004, 19(6): 873~878.

XIAO Ying-chao, LIU Yu, ZHANG Guo-zhou. Radiation Inside a Low Power Argon Arcjet Thruster[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(6): 873~878.

[3] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.

[4] Sankovic John M, Curran Francis M. Arcjet Thermal Characteristics[R]. AIAA 91- 2456.