

文章编号: 1000-8055(2004) 04-0536-05

同轴形微波等离子推力器数值计算

唐金兰, 何洪庆, 毛根旺, 杨 涓, 韩先伟, 黄晓砥
(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 介绍了 100 W 功率同轴形微波等离子推力器(MPT) 的系统结构、谐振模式, 采用耦合求解 Maxwell 方程、Saha 方程和 Navier-Stokes 方程的方法, 对 100 W 同轴形 MPT 谐振腔内的电磁场、等离子体与流场间的耦合问题进行了数值计算并预估了原理实验样机的性能。计算结果表明, 100 W 同轴形 MPT 结构系统的原理可行, 性能较好, 有较好的发展前景。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 微波等离子体推力器; 谐振腔; 耦合计算
中图分类号: V 439. 2 文献标识码: A

Theoretical and Experimental Research on Microwave Plasma Thruster With Coaxial Resonant Cavity

TANG Jin-lan, HE Hong-qing, MAO Gen-wang,
YANG Juan, HAN Xian-wei, HUANG Xiao-di

(College of Astronautics,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The system construction and resonance mode of 100 W power Microwave Plasma Thruster (MPT) With Coaxial Resonant Cavity are introduced. The Resonant Cavity is an important part in the MPT system in which the microwave energy is absorbed by the working gas. In this paper, the numerical simulation of the coupling between microwave energy and plasma flow under the resonant state was analyzed using a coupled Maxwell, Saha and Navier-Stokes solver and the performance of prototype was calculated. All results show that the system principles of 100 W MPT are feasible and the performance of prototype is good.

Key words: aerospace propulsion system; Microwave Plasma Thruster (MPT); resonance cavity; coupled calculation

微波等离子体推力器(MPT)是高比冲、长寿命、小推力的推进系统, 是一种新型的在研电热推进装置, 可用于卫星的姿态控制、位置保持, 甚至转轨。优点为无电极烧蚀、效率高、工作电源简单^[1~4]。

国内对 MPT 的探索研究开始于 1992 年,

1997 年以后开始筹建地面原理实验系统。现已建成 1 000 W 与 100 W MPT 两套地面实验系统, 完成了谐振腔结构、谐振模式、谐振腔内等离子体形成及其与微波耦合机理分析等多项应用探索性研究^[5~7]。本文是在前期工作的基础上, 对 100 W MPT 谐振腔内的电磁场、等离子体与流场间的耦合

收稿日期: 2003- 09- 09; 修订日期: 2003- 12- 01

基金项目: 国家 863 计划支持资助项目(863-2-2-5-12); 国防科工委基础研究资助项目(J1400D00)

作者简介: 唐金兰(1966-), 女, 广西人, 西北工业大学航天学院副教授, 博士, , 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

问题进行数值计算并预估原理实验样机的性能。

1 100 W 微波等离子推力器

谐振腔是微波等离子推力器(MPT)必不可少、组织微波能量吸收的重要部件。谐振腔的结构形式一般有同轴形、圆柱形和矩形。对于功率大于 500 W 的 MPT 系统,一般采用圆柱形谐振腔、2 450 MHz 以上频率的连续波微波源,并在腔体头部端面轴心处进行微波耦合、在侧壁上开出切向小孔使工质气体沿壁面旋转着进入腔内,有利于等离子体的形成与稳定。这种方式结构简单、稳定性好、效率高;而对于功率小于 200 W 的 MPT 系统,若采用 2 450 MHz 频率的连续波微波源,则一般采用同轴形谐振腔,并在腔体侧壁进行微波耦合、在侧壁或轴向开出工质气体的进气孔,在减小谐振腔体积和重量、降低系统造价的同时,可使功率小于 200 W 的同轴形 MPT 在地面环境下可靠启动;而若采用 2 450 MHz 以上频率的连续波微波源,亦可采用圆柱形谐振腔,如美国宾州大学的 Micci 教授采用 7 500 MHz 频率的连续波微波源、研制出的圆柱形 MPT 系统,在功率小于 200 W 时,实现了系统的可靠启动与稳定工作,产生了稳定的推力。

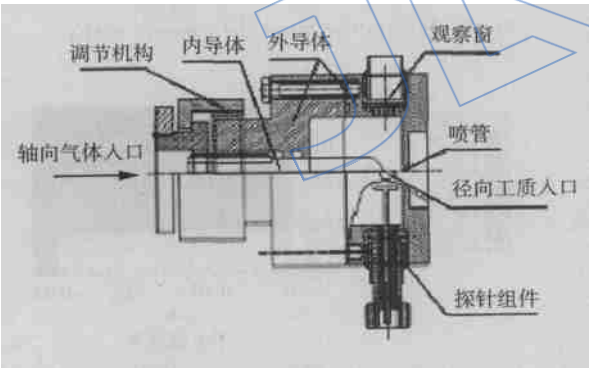


图 1 同轴形 MPT 结构简图

Fig.1 The sketch of MPT with coaxial resonant cavity

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0$$
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} \delta_{i,j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \sigma E \times B$$
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right] + J \cdot E$$

(1)

式中: $\sigma E \times B$ 为 Lorentz 力; $J \cdot E$ 是 Joule 热。

谐振腔的结构形式和尺寸与微波频率和谐振模式密切相关。对于功率小于 200 W 的谐振腔,为便于实验系统的建设,希望采用工业常见的微波频率 2 450 MHz。因此,通过选择,确定 100 W MPT 样机采用谐振模式为 TEM 的同轴型谐振腔。同轴形谐振腔的使用使得以 2 450 MHz 为频率的 MPT 系统,在不降低效率、不增加系统研制复杂性与成本的条件下,推力器系统的体积和结构质量减小、功耗降低。

100 W 同轴形 MPT 样机的结构简图如图 1 所示。

2 同轴形微波等离子推力器谐振腔内等离子体流场的数值模拟

MPT 谐振腔内的流场是等离子体条件下的传热与流动问题。等离子体是一种由正负带电粒子组成的、总体上几乎是电中性的集合体,是一种导电率很高的导电流体,同时由于微波、等离子体、流场间的相互耦合作用,使谐振腔内等离子体流场的数值模拟不同于中性气体流场。MPT 谐振腔内等离子体的形成过程为:微波源产生的一定频率和功率的微波经波导和/或电缆传输至谐振腔,通过调谐使微波反射功率至最小,微波在同轴谐振腔内产生 TEM 模式的谐振电磁场,在电磁场最强的区域形成放电区,当工质(N_2 , He , Ar 等)通过谐振放电区时吸收微波能量产生电离而形成高温等离子体。由于等离子体中粒子的平均自由程远小于谐振腔的特征尺度,因此在腔内流场计算时可以将等离子体作为连续介质处理。

2.1 控制方程

2.1.1 流场控制方程

描述气体流动最完整的方程是 N-S 方程。对于 MPT 谐振腔内等离子体条件下的流动控制方程采用耦合了电磁场的广义 N-S 方程组,其张量形式为:

2. 1. 2 电磁场方程

描述电磁场的最基本的方程是经典的 Maxwell 方程, 由 Maxwell 方程变换所得的同轴谐振腔内 TEM 谐振模式的场分量表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_r}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \left[-\frac{\partial H_\theta}{\partial z} - \sigma E_r \right] \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \sigma E_z \right] \\ \frac{\partial H_\theta}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} - s H_\theta \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: E 是电场强度, H 是磁场强度, ϵ 是腔体内介质的介电常数 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, 其中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, σ 是腔体内介质的电导率, μ 是腔体内介质的磁导率, s 是腔体内介质的磁电阻率, 它对应磁场的损耗。

由方程(2)可见, 在求解电磁场方程中, 出现了依赖于温度的电导率 σ , 而流场控制方程(1)中的 Lorentz 力与 Joule 热又依赖于电磁场解, 因此流场与电磁场的解相互耦合, 需同时进行。

2. 1. 3 等离子体方程

对于等离子体, 采用单温度热平衡等离子体模型, 仅考虑一次电离反应, 如对于氩等离子体, 仅考虑其电离—复合反应: $\text{Ar} \rightleftharpoons \text{Ar}^+ + \text{e}$, 而对于等离子体中的组分, 可有如下的关系式:

$$\left. \begin{aligned} p &= k(n_a + 2n^+) T \\ n_e &= n^+ \\ \frac{(n^+)^2}{n_a} &= \frac{2Z^+}{Z_a} \frac{(2\pi m_e k T)^{3/2}}{h^3} \exp \left(-\frac{E_0^\infty}{kT} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中:

$$Z^r = \sum_i g_i \exp \left(-\frac{E_{r,i}}{kT} \right)$$

Z^r 是第 r 种粒子的配分函数(对于一次电离有 $r = a$ 表示原子, $r = +$ 表示一次电离的离子); p 与 T 是等离子体压强与温度, n_e, n_a, n^+ 分别为等离子体中电子、原子和一次电离的离子的数密度; 式(3)中的第三个方程是一次电离的 Saha 方程的具体表达形式。

2. 2 同轴形 MPT 谐振腔内的数值计算

考虑到微波电磁场在空间相互正交和铰链的关系, 本文采用交错网格、用时域有限差分(FDTD)法求解电磁场、SIMPLE 方法求解流场, 对方程组(1)和(2)进行耦合求解。首先计算了经典的中性气体二维突扩管流以验证中性气体数值

计算的正确性, 再计算给定压强与温度的气体容器中等离子体中的各粒子数密度以验证单温度热平衡等离子体模型及计算的正确性。在此基础上, 假设谐振腔处于谐振状态且腔内气体为二维轴对称可压缩层流, 对谐振腔内等离子体流场进行数值模拟, 得到压强与温度后, 利用方程组(3)求出等离子体各组分。

计算的几何条件: 微波频率为 2 450 MHz, 由微波频率确定的同轴形谐振腔的长度为 31 mm; 为保证同轴形谐振腔内微波能量的最小衰减, 确定内导体直径为 10 mm、外导体内径为 40 mm。

计算结果: 在 100 W MPT 同轴谐振腔内的数值计算中, 对以氦气为工质、工质流量分别为: $n\&= 4.09 \text{ mg/s}$ 和 $n\&= 6.14 \text{ mg/s}$, 微波功率从

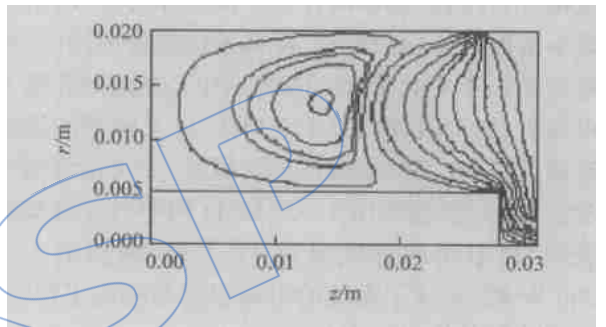


图 2 同轴形谐振腔内气体流线图
Fig. 2 Stream line in coaxial resonant cavity

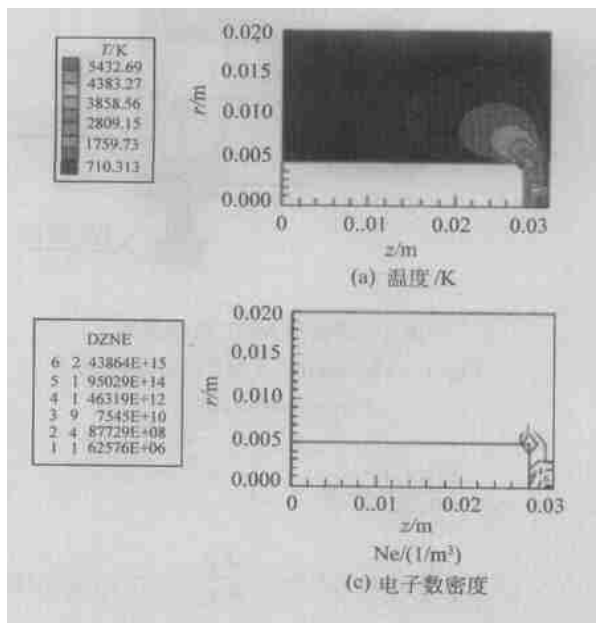


图 3 同轴形谐振腔内等离子体区典型的等温线及电子密度等值线图
Fig. 3 Contours of temperature and electron density in coaxial resonant cavity

30 W~80 W 的情况,进行了理论计算,典型的数值模拟及样机性能预估结果如图 2~图 5 所示。

图 2 是同轴谐振腔内典型的气体流线图。

图 3 是 MPT 稳定工作状态下腔内等离子体区典型的等温线及电子数密度等值线图。

图 4 是腔内工质气体的平均温度、腔内压强和电子数密度随微波功率的变化关系。

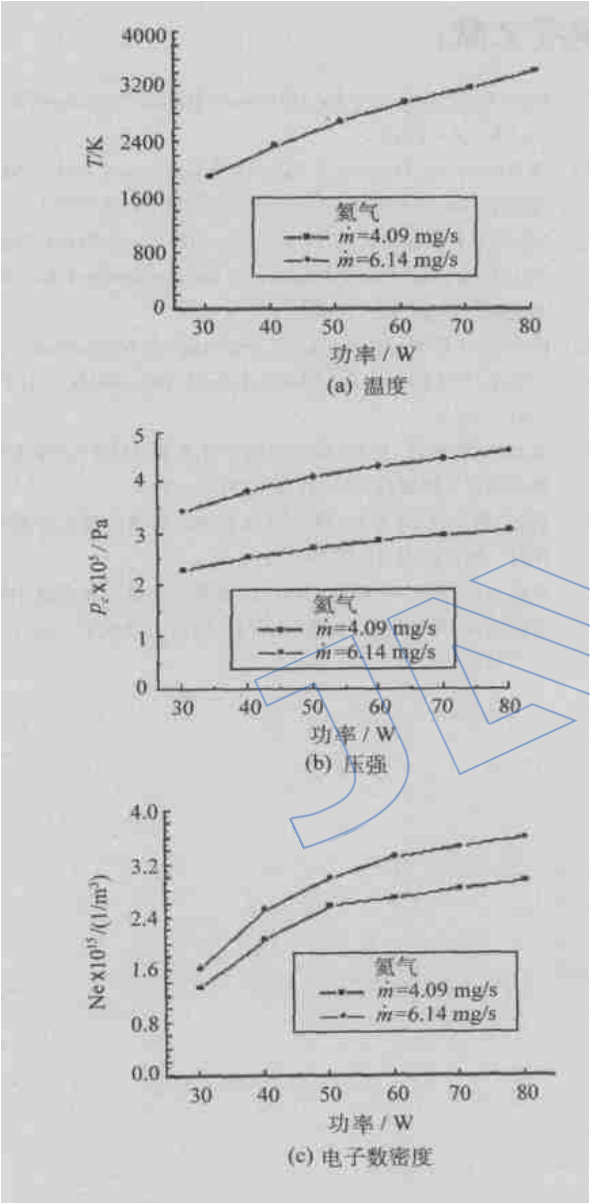


图 4 同轴形谐振腔内工质气体的平均温度、腔内压强和电子数密度随微波功率的变化

Fig. 4 Change of temperature, pressure and electron density with microwave power in coaxial resonant cavity

图 5 是 100 W MPT 原理样机在真空环境下的推力和比冲随微波功率的变化(He)。

图 6 是 100 W MPT 原理样机在真空环境下

典型的热试实验图像(He)。

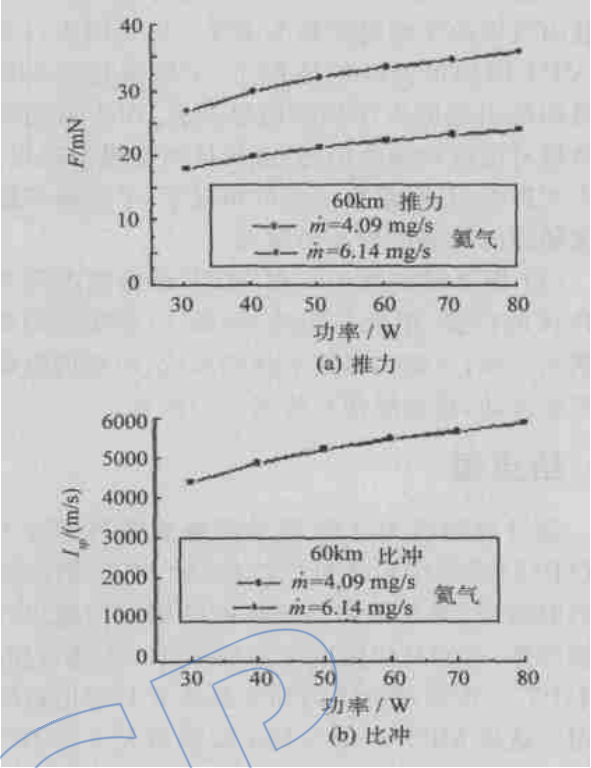


图 5 100 W MPT 样机真空环境下推力、比冲随微波功率的变化(He)

Fig. 5 Impulse vs. microwave power of 100 W MPT under vacuum condition

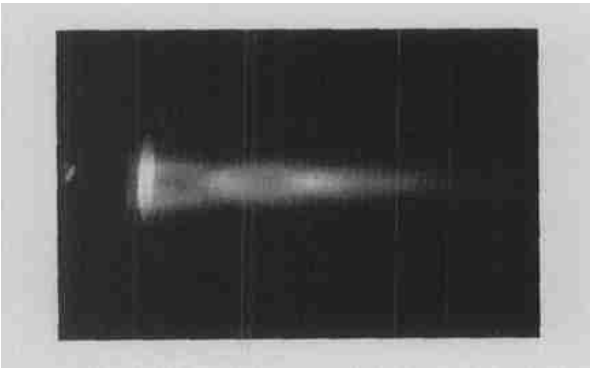


图 6 100 W 同轴形 MPT 真空热试实验图像

Fig. 6 The stable state of 100 W MPT operation on vacuum condition

由图 2~图 6,可得出如下结论:

(1) 在工质气体流量一定的情况下,输入的微波功率愈大,谐振腔内的平均温度和电子数密度愈高,腔内压强也略有增大。这是因为微波功率增大,使 Joule 热增大,从而产生更热、更多的电子,导致更多的中性气体被电离,因而使腔内温度升高、等离子体的电子数密度增大,温度的升高导致腔内压强也略有增大。

(2) 在微波功率一定的情况下,注入腔内的工质流量增大,腔内压强和平均电子数密度增大而腔内气体的平均温度基本不变。这是因为,100 W MPT 同轴谐振腔的体积小,工质流量的少量增量即可引起腔内压强的明显变化,而少量的流量增量对微波功率的消耗(或气体对能量的吸收)基本无影响,且在温度不变的情况下,平均电子数密度随腔内压强的增大而增大。

(3) 图 3 反映的 100 W MPT 谐振腔内等离子体区的位置、形状与实验时(图 6)观察到的现象基本一致;且腔内等离子体的形成,对腔内电磁场产生扰动,扰动规律有待进一步研究。

3 结束语

设计研制出 100 W 同轴形微波等离子推力器(MPT)原理实验样机后,应该对 MPT 谐振腔内的电磁场、等离子体与流场间的耦合问题进行数值计算,目的是预估原理实验样机的性能,同时对 MPT 工作原理的认识和实验研究起理论指导作用。这是 MPT 启动与稳定实验研究中必不可少的。

100 W MPT 同轴形谐振腔内的集中电场强度使工质气体(氙气或氦气)在地面和真空条件下均能够被击穿,产生等离子体,表明低功率的同轴

形 MPT 不需要任何辅助条件就可以启动工作。

对 100 W 同轴形 MPT 进行的数值计算分析及成功的真空实验表明,同轴形 MPT 的原理可行、工作可靠。

致谢 参加本项目研究工作的还有屈昆、魏坤、陈君、宋军、夏广庆、林榕、苏伟仪等,在此深表感谢!

参考文献:

- [1] Micci M M. Prospects for Microwave Heated Propulsion[R]. *AIAA*- 84- 1390.
- [2] Whitehair S, Asmusse J. Recently Experimental with a Microwave Electrothermal Thrusters[R]. *AIAA* 85- 2051.
- [3] Nordling D, Micci M M. Low Power Microwave Arcjet Testing: Plasma and Plume Diagnostics and performance Evaluation[R]. *AIAA* 99- 2717.
- [4] Diamant J E, Brandenburg, et c. Performance Measurement of a Water Fed Microwave Electrothermal Thruster[R]. *AIAA* 2001- 3900.
- [5] 毛根旺, 何洪庆, 杨涓. 微波等离子推进器(MPT)的应用探索研究[J]. *推进技术*, 1998, 19(3): 21- 26.
- [6] 杨涓, 何洪庆, 毛根旺. 微波等离子推力器微波模式合理选择[J]. *推进技术*, 1999, 20(1): 76- 79.
- [7] 唐金兰, 何洪庆, 毛根旺, 万伟. 微波等离子推力器等离子体形成及其与微波耦合机理分析[J]. *固体火箭技术*, 2002, 25(2): 31- 35.