

文章编号: 1001-2486(2007)05-0014-04

脉冲等离子体推力器工作过程一维磁流体动力学数值模拟*

杨乐, 周进, 尹乐, 吴建军, 石杰
(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 通过耦合脉冲等离子体推力器(PPT)工作过程中电场、磁场、流场之间的相互作用, 描述了电容器放电、推进剂烧蚀、等离子体加速流动等过程, 建立了基于磁流体动力学(MHD)的一维非定常数学模型, 对 PPT 的工作过程进行数值模拟。对数值模拟结果作了相应分析, 并将部分模拟结果与实验数据进行了比较。结果表明, 模型正确反映了推力器放电过程、推进剂烧蚀质量与表面温度的变化趋势。

关键词: 脉冲等离子体推力器; 工作过程; 磁流体动力学; 数值模拟

中图分类号: V439 文献标识码: A

One-dimensional Numerical Simulation of Magnetohydrodynamic for Pulsed Plasma Thruster

YANG Le, ZHOU Jin, YIN Le, WU Jian-jun, SHI Jie

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: By way of Coupling the effects among the electric field, magnetic field and flow field in the pulsed plasma thruster, the process of the capacitor discharge, propellant ablation and plasma acceleration are characterized, and a one-dimensional time-dependent model based magnetohydrodynamic(MHD) for PPT is presented in this paper. The simulation results are analyzed and compared with the experiment. The result exhibits that the model perfectly reveals the thruster discharge process, variation of ablated mass and surface temperature of propellant.

Key words: pulsed plasma thruster; operation process; magneto hydrodynamic; numerical simulation

脉冲等离子体中部分电离分子气体的流动是非常复杂的, 必须采用数值方法求解。目前国外对 PPT 的工作过程开展了相关的研究工作, 建立了包括零维模型^[1]、基于 RLC 电路的集总参数模型^[2-3]、磁流体动力学(MHD)模型^[4-6]等在内的多种数学模型。基于 RLC 电路的集总参数模型可以对特定结构的 PPT 分析推力器结构参数及电参数变化对 PPT 性能的影响, 但不能揭示其物理本质。磁流体动力学模型从等离子体流动的物理本质方面对 PPT 进行研究和分析。俄亥俄州立大学^[4]开发了二维磁流体动力学仿真软件, 该软件基于二维非稳态磁流体动力学程序 MACH2, 能描述 PPT 推进剂烧蚀、电离和加速过程。然而, 文献[6]利用 MACH2 计算得到的烧蚀质量变化曲线呈现先上升后下降的变化趋势, 这不符合推力器的实际工作情况。

1 PPT 组成与工作原理

平行板电极 PPT 由两个平行板电极、推进剂(聚四氟乙烯, 俗称特氟隆)、电容器、火花塞、点火电路以及推进剂供应装置(弹簧)等组成(如图 1 所示)。推力器的工作过程是: 将电容器充电至所需要的电压, 随后火花塞点火, 电容器沿着推进剂表面放电。推进剂表

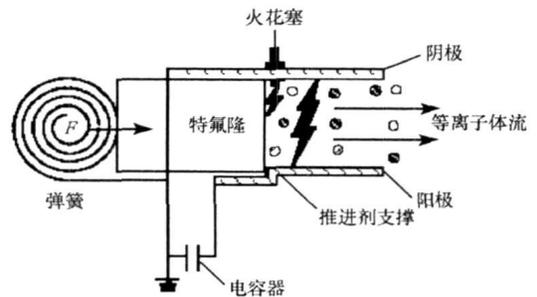


图 1 平行板电极 PPT 示意图

Fig. 1 Sketch of parallel-plate electrode PPT

工作过程是: 将电容器充电至所需要的电压, 随后火花塞点火, 电容器沿着推进剂表面放电。推进剂表

* 收稿日期: 2007-04-10

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 杨乐(1978-), 男, 博士生。

面形成一个电流, 接下来是一系列复杂的过程: 热流将特氟隆表面的分子解聚、分裂、电离成等离子体, 然后在电磁力和气动压力的共同作用下, 等离子体被加速, 膨胀喷出产生推力。

2 数学模型

由平行板电极 PPT 工作过程可知, PPT 运行可以分为三个主要的进程: 电容器放电、推进剂烧蚀、等离子体加速流动, 因此我们将其模型分为三个互相联系的子模型: 电路模型、烧蚀模型、等离子体流动模型。

2.1 电路模型

PPT 工作时, 其放电过程可以认为是一个典型的 RLC 电路放电过程。根据基尔霍夫定律, 通过下式可以获得随时间变化的回路电流

$$\left(R_0 + R_p\right) i + L_0 \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U_c \quad (1)$$

其中, L_0 为回路感抗, R_0 为外电路阻抗, R_p 为等离子体阻抗, C 为电容, U_c 为储能电容器充电电压。

2.2 推进剂烧蚀模型

设 Q_p 为特氟隆蒸汽 \ 等离子体界面的热流密度, 则传向特氟隆的净热流密度为

$$Q = Q_p - \dot{m} \cdot \left[\frac{u^2}{2} + \Delta h \right] \quad (2)$$

其中, \dot{m} 为单位面积的质量流率, u 为特氟隆蒸汽 \ 等离子体界面的速率, Δh 为推进剂的蒸发潜热。因为 PPT 工作过程时间极短(一般为几微秒到几十微秒), 等离子体向推进剂的传热过程可假设为半无限大固体的非稳态传热, 其方程为

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (3)$$

其中, T_s 为特氟隆温度, a 为热扩散率。

2.3 等离子体流动模型

对于 PPT, 在电极通道内, 流动参量垂直于极板方向的分量受极板的束缚, 与沿流动方向平行分量相比, 比较小, 对推力器性能的影响也小。此外, 严格意义上的磁流体动力学方程组具有双曲型方程和抛物型方程的特征, 求解存在较大的困难。为此, 本文对 PPT 工作过程中的等离子体流动作以下处理:

- (1) PPT 通道内的等离子体流动是一维的, 沿轴向任一截面上等离子体的特征量相等;
- (2) 等离子体由聚四氟乙烯($(C_2F_4)_n$) 烧蚀、离解生成的 C_2F_4 分子组成, 不考虑电极材料的侵蚀;
- (3) 等离子体采用单一温度且处于局部热力学平衡(LTE) 状态, 符合理想气体状态方程;
- (4) 忽略粘性、霍尔效应等因素的影响;
- (5) 忽略等离子体的轴向热传导, 将等离子体视为灰体。

基于以上基本假设, 脉冲等离子体推力器中的等离子体流动可以采用简化的一维磁流体动力学方程组来描述, 具体形式如下

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u u + p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \frac{\partial}{\partial x} \left[u \left(\rho e + p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \right] = \frac{j^2}{\sigma} \\ \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uB) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu_0 \sigma} \frac{\partial B}{\partial x} \right] \\ e = \rho \left(\frac{p}{\gamma - 1} \right) + \frac{u^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \\ p = \rho RT \end{cases} \quad (4)$$

其中, ρ 为等离子体密度, u 为等离子体速度, p 为气动压力, B 为磁感应强度, γ 为等离子体比热比(对于特氟隆, $\gamma = 1.3$), μ_0 为真空磁导率($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$), j 为电流密度, σ 为等离子体电导率, T 为等离子体温度, R 为气体常数。

3 数值模拟及结果分析

为验证模型的可靠性,对实验室用平行板电极 PPT 的工作过程进行了数值模拟,其结构参数与电参数如表 1 所示。

3.1 初始条件及边界条件

PPT 工作初始,火花塞放电,释放出少量的带电粒子,速度较小,且放电时间相对主放电过程很短,其阻抗特性对主放电过程影响较小。因此,以火花塞放电完毕后通道内的参量值作为计算的初始条件,即 $t = 0$ 时, $\rho = \rho_0$, $u = 0$, $T = T_0$, $B = 0$ 。

计算时取 6cm 长度,其中 15mm 为推力器通道长度,其余为计算缓冲区。入口边界条件中温度、密度由烧蚀模型给定,速度通过外推获得。其他边界条件由约束条件决定或外推。

计算过程中,假设等离子体的电导率为常数,根据文献[8]取 $\sigma = 5 \times 10^3 \text{s/m}$ 。

3.2 数值计算方法

采用 Runge-Kutta 法求解电路方程(1),采用 MacCormack 显式二步格式求解方程组(4)的等离子体流动部分,采用差分法求解半无限大固体的非稳态传热方程(3)以及方程组(4)的磁场扩散部分。

3.3 模拟结果及分析

图 2~ 图 7 分别给出了脉冲等离子推力器性能参数变化趋势及加速通道内部分等离子体参量的变化趋势。图 2 显示 PPT 在 $10\mu\text{s}$ 左右放电完毕,波形为典型的 LCR 电路放电波形,与实验结果(图 3)对比,基本吻合。

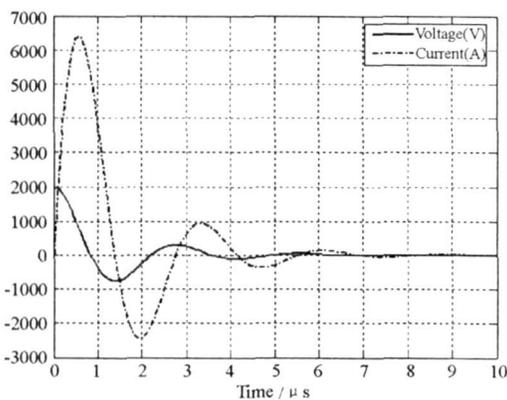


图 2 放电电压与电流(模拟)

Fig. 2 Discharge voltage and current (Simulation)

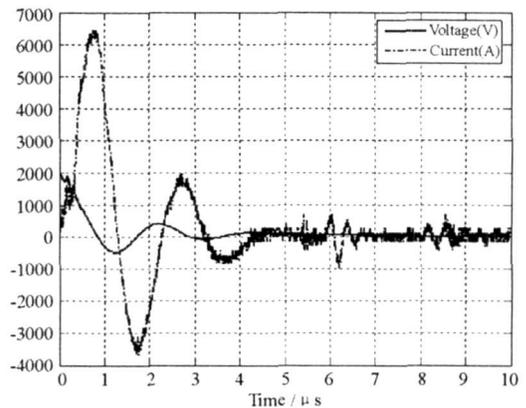


图 3 放电电压与电流(实验)

Fig. 3 Discharge voltage and current (Experiment)

实验测到的每次脉冲平均烧蚀质量为 $8.6\mu\text{g}$,而图 4 中计算得到从放电开始到 $100\mu\text{s}$ 时脉冲烧蚀质量为 $2.04\mu\text{g}$,仅为实验结果的 23.7%。从烧蚀质量的变化曲线可以看出,推力器放电结束后烧蚀质量仍在不断增加,这是由于放电结束后特氟隆表面仍然处在较高的温度(图 5),引起特氟隆滞后蒸发和宏观粒子发射,这与文献[7]实验测到的结果是一致的。

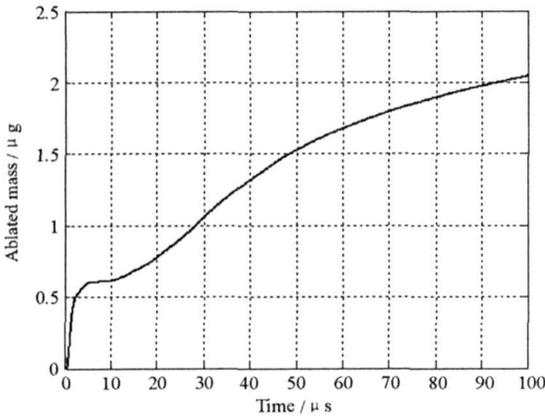


图 4 烧蚀质量随时间的变化

Fig. 4 Temporal variations of ablated mass

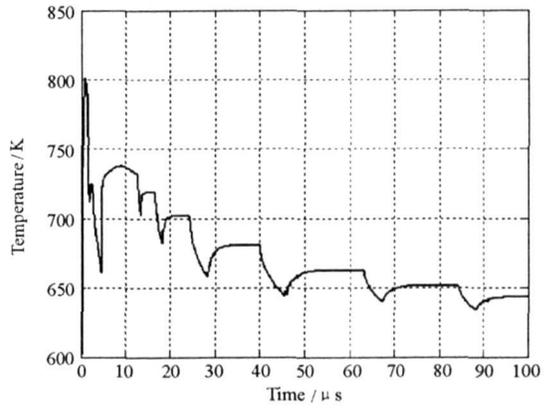


图 5 特氟隆表面温度随时间变化

Fig. 5 Temporal variations of Teflon surface temperature

图 6、图 7 为等离子体加速过程中总压和磁压的分布曲线,对比发现,在推力器工作过程中,磁压占总压力的绝大部分,也就是说洛伦兹力的作用主导了 PPT 工作过程中等离子体的加速,表明平行板电极 PPT 是一类以电磁加速为主的推力器。

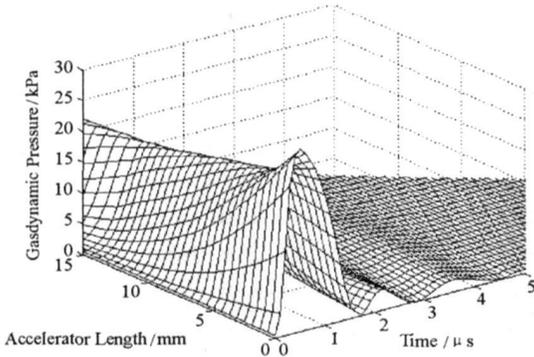


图 6 等离子体总压分布曲线

Fig. 6 Plasma pressure distribution curves

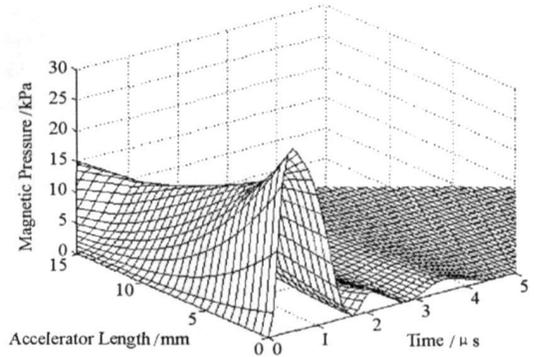


图 7 等离子体磁压分布

Fig. 7 Plasma magnetic pressure distribution curves

4 结论

建立了 PPT 工作过程的一维 MHD 模型。通过对实验室用 PPT 进行数值模拟并与实验结果比较,表明该模型基本反映了 PPT 工作过程中的电容器放电、推进剂烧蚀、等离子体流动等过程的物理本质。利用模型计算得到的电容器放电过程、推进剂烧蚀质量及表面温度变化趋势与实验测到的结果一致,表明利用一维、单流、单温模型进行 PPT 的工作过程分析是可行的。进一步的研究工作需要建立包含等离子体输运模型在内的多温多流模型,以表征等离子体流动过程中电子、离子及中性粒子的分布情况。

参考文献:

- [1] Brito C M, et al. Zero-dimensional Model for Preliminary Design of Ablative Pulsed Plasma Teflon Thrusters [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(6).
- [2] Wagner H P, Anweter-kartz M. Slug Model and Snowplow Model for Pulsed Plasma Thruster Description [R]. AIAA 2004- 3466, 2004.
- [3] Laperriere D D. Electromechanical Modeling and Open-loop Control of Parallel Plate Pulsed Plasma Microthrusters with Applied Magnetic Fields [D]. Master Thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2005.
- [4] Mkelidze Y G. Theoretical Modeling and Optimization of Ablation-fed Pulsed Plasma Thrusters [D]. Doctor Thesis, Ohio State University, 1999.
- [5] Lin G, Kamiadakis G E. High-order Modeling of Micro-pulsed Plasma Thrusters [R]. AIAA 2002- 2872, 2002.
- [6] Turchi P J, Mkelidze P G. Modeling of Ablation-fed Pulsed Plasma Thrusters [R]. AIAA 95- 2915, 1995.
- [7] Spanjers G G, et al. Investigation of Propellant Inefficiencies in a Pulsed Plasma Thruster [R]. AIAA 96- 2723, 1996.
- [8] Kovitya P. Thermodynamic and Transport Properties of Ablated Vapors of PTFE, Alumina, Perspex, and PVC in the Temperature Range 5000-30 000K [J]. IEEE Transactions on plasma science, March 1984.