

脉冲等离子体推力器放电室构型参数的影响分析研究*

刘 祺, 杨 磊, 张益齐, 付春雨, 赵 絮, 黄玉平, 郑再平

(北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要: 通过开展脉冲等离子体推力器 (Pulsed plasma thruster, PPT) 放电试验, 结合理论计算与分析, 研究了放电室构型参数对推力器性能的作用机理与影响规律。结果表明: 推进剂烧蚀表面附近电极间距的增大使放电电流的峰值降低; 增大电极高宽比使电感梯度提高, 并使电磁冲量得到提升。考虑到放电电流集中在推进剂表面附近, 电流峰值主要受到放电室上游电极间距的影响, 因此, 采用在放电室下游增大电极扩张角的方法使电极高宽比增大, 通过这种空间上的分离, 能够解决增大电流峰值与提高电感梯度之间的矛盾, 实现推力器电磁冲量的综合提升。相比于常规PPT所使用的矩形推进剂构型, V形的推进剂构型可有效提升推力器的气动冲量。

关键词: 脉冲等离子体推力器; 放电室构型; 放电电流; 电感梯度; 元冲量

中图分类号: V439+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2020) 12-2874-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200167

Analysis and Study on Influence of Discharge Chamber Configuration for Pulsed Plasma Thruster

LIU Qi, YANG Lei, ZHANG Yi-qi, FU Chun-yu, ZHAO Xu, HUANG Yu-ping, ZHENG Zai-ping

(Beijing Research Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

Abstract: The mechanism and effects of discharge chamber configuration parameters on thruster performance are investigated by conducting discharge experiments on pulsed plasma thruster (PPT), combining with theoretical calculation and analysis. The results show that the peak value of the discharge current decreases with the increase of the gap between the electrodes near the ablative surface of the propellant. The increase of the aspect ratio of electrodes leads to a higher value of the inductance gradient and a better performance of electromagnetic impulse bit. Considering the discharge current concentrates on the area near the propellant surface, the current peak is mainly affected by the gap between electrodes in the upstream of the discharge chamber. So the method of increasing the electrodes flared angle in the downstream of the discharge chamber is adopted, being aimed to increase the aspect ratio. Such separation could settle the paradox of increasing the current peak value and increasing the inductance gradient and synthetically enhance the electromagnetic impulse bit of PPT. Comparing with the rectangular propellant configuration of the conventional PPT, the V-shape configuration of the propellant could efficiently enhance the gas dynamic impulse bit of the thruster.

* 收稿日期: 2020-03-26; 修订日期: 2020-06-24。

基金项目: 国家自然科学基金 (11602016)。

作者简介: 刘 祺, 博士生, 研究领域为脉冲等离子体推力器的实验与仿真。E-mail: liuqi93922@163.com

通讯作者: 杨 磊, 博士, 高级工程师, 研究领域为空间电推进技术及放电等离子体。E-mail: ylforeverbit@126.com

引用格式: 刘 祺, 杨 磊, 张益齐, 等. 脉冲等离子体推力器放电室构型参数的影响分析研究[J]. 推进技术, 2020, 41(12):2874-2880. (LIU Qi, YANG Lei, ZHANG Yi-qi, et al. Analysis and Study on Influence of Discharge Chamber Configuration for Pulsed Plasma Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(12):2874-2880.)

Key words: Pulsed plasma thruster; Configurations of the discharge chamber; Discharge current; Inductance gradient; Impulse bit

1 引言

脉冲等离子体推力器(Pulsed plasma thruster, PPT)以其功率灵活可变、结构简单、可靠性高、在低功率下能够保持高比冲等特点,可用于执行微小型卫星的姿态控制、阻力补偿以及星座相位控制等任务^[1-2]。2019年,“吉林一号”的两颗光谱卫星分别集成安装了两套PPT电推进系统,立方星“灵鹊1A卫星”也搭载了PPT作为星上推进装置。随着PPT受到越来越多的关注,研制高性能的PPT成为其发展的趋势。

针对高性能PPT的研制,国内外众多研究者从实验和数值计算两方面开展了PPT构型与性能方面的研究^[3-7]。研究发现,推力器几何结构的合理设计有助于提高性能^[3]。由于在PPT的工作过程中,烧蚀、电离和有效加速都发生在放电室内,因此放电室构型参数的选择对推力器的工作过程和性能产生着重要的影响。PPT的放电室是电极与推进剂烧蚀表面构成的空间,其构型参数包括电极间距以及推进剂型面夹角等,这些参数是结构优化设计的重要方向。在实验方面,德国斯图加特大学研制了舌形扩张电极的PPT样机ADD SIMP-LEX并对其开展理论分析和实验研究^[8-10]。Schönherr等^[5]采用统计学方法,基于Taguchi矩阵,对不同电极构型的推力器进行性能测试实验研究,发现电极形状和扩张角对推力器性能均产生一定的影响。张锐^[6]通过实验研究,发现极板间距减小使推力器的比冲和效率增大。张华等^[11]研究发现对于不同形状的极板,扩张角对PPT性能的影响呈现出不同的规律。在理论模型方面,Krejci等^[12]建立分析模型评估PPT的电极结构,并将电磁冲量作为衡量推力器性能的标准。程笑岩等^[13]建立数值模型,评估电极宽度比(舌形电极最宽与最窄处尺寸之比)和扩张角对推力器性能的影响,结果表明,元冲量随宽度比和扩张角的增大而增大。综上可知,通过放电室构型参数的调整能够优化PPT的性能,以适应更高要求的空间任务。以上研究阐述了电极构型参数对推力器性能的影响,然而,若要得出更普遍的规律,仍需从机理上解释构型参数对推力器性能产生影响的原因。为此,本文将探究放电室构型对推力器性能的影响规律背后的物理机制。此外,前人对推力器的构型研究集中在电极的构型,而

推进剂的烧蚀表面构型也是放电室构型的关键部分,因此,推进剂型面特征对推力器元冲量的影响也是本文的研究内容之一。

本文通过放电实验结合理论公式估算推力器元冲量,揭示并从机理上分析电极构型和推进剂型面对元冲量的影响规律,为推力器的优化设计提供建议,并加深对PPT工作过程的理解。

2 实验装置及研究方法

2.1 实验系统及装置

实验系统如图1所示,推进系统包括推力器本体和电源系统,测试仪器为罗氏线圈、高压探头、示波器,真空舱为实验提供真空环境。真空舱直径为1m,长度为0.65m,真空系统由两级真空泵组成,实验时真空舱内的气压小于等于 5×10^{-3} Pa。罗氏线圈布置在推力器储能电容的电极柱上,放电时电极柱中的电流通过线圈,线圈在感生磁场中产生感应电动势,并通过真空舱外接RC积分器,从而获取推力器的放电电流参数。

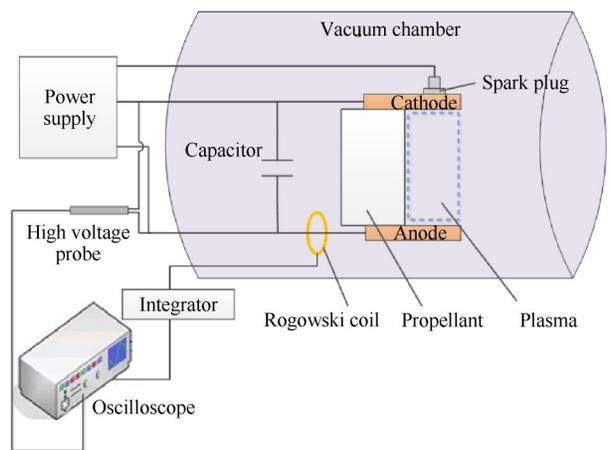
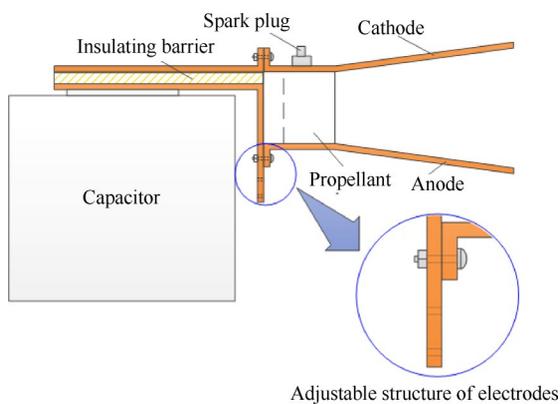


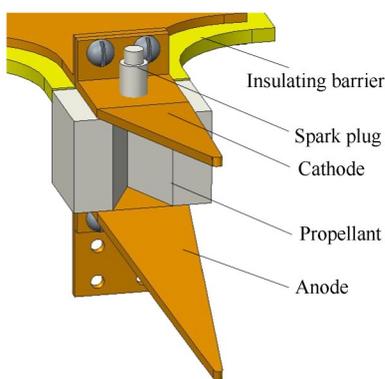
Fig. 1 Schematic diagram of the PPT experimental system

PPT实验样机的构型如图2所示,储能电容器的电容量为 $80 \mu\text{F}$ 。为了能够灵活改变放电室的结构参数,设计了可拆卸、可调间距的电极结构:使用螺纹连接方式将电极头部与连接电容的极板固定,可更换不同构型的电极头部;在与电容器连接的阳极板上,布置多组连接阳极头部的限位孔,达到电极间距可调的目的。PPT放电室构型如图3所示,电极和推进剂表面构成了一个放电室,阴极与阳极平面呈一定角度,即电极呈扩张形,扩张角为 β ;推进剂表面所

呈夹角为 α ;极板间距离和极板宽度分别用 h 和 w 表示, h 和 w 均为水平方向位置 x 的函数, h_0 和 w_0 为推进剂烧蚀表面附近(即 $x=0\text{mm}$)的平行段电极间距和电极宽度。研究中涉及的工况信息如表1所示。



(a) 2D side view



(b) 3D structure of the electrodes and propellant

Fig. 2 Practical structure of the PPT

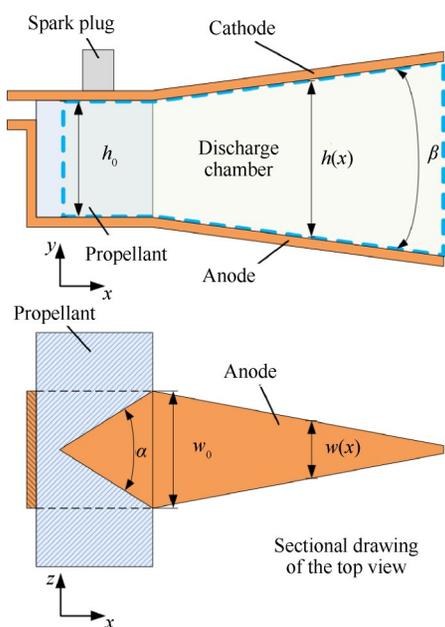


Fig. 3 Schematic diagram of PPT discharge chamber configuration

Table 1 Investigated parameters and their values

| Parameters | Value |
|-----------------|------------------------|
| U_0/V | 1000, 1200, 1300, 1500 |
| $C/\mu\text{F}$ | 80 |
| $\beta/(\circ)$ | 10, 20 |
| h_0/mm | 21, 28, 36 |
| w_0/mm | 20 |

2.2 性能参数计算方法

PPT是电磁型的推力器,因此,电磁冲量是PPT的重要性能指标之一,故本文选取电磁冲量作为性能指标的评估依据。电磁冲量可由力对时间积分计算

$$I_{EM} = \int_0^T F_{EM}(t) dt \quad (1)$$

式中 T 为单个放电周期的脉冲持续时间,电磁力表示为^[14]

$$F_{EM} = hw \int_0^\delta j B_z dx \quad (2)$$

式中 δ 为电流片的厚度, j 为电流密度,垂直于 x - y 平面方向的磁场 B_z 可由文献[5]提供的公式结合电极结构计算

$$B_z = \frac{\mu_0 J}{2\pi w} \left[\arctan\left(\frac{z}{y}\right) + \arctan\left(\frac{w-z}{y}\right) + \arctan\left(\frac{z}{h-y}\right) + \arctan\left(\frac{w-z}{h-y}\right) \right] \quad (3)$$

式中 J 为放电电流, μ_0 为真空磁导率。

公式(2),(3)中含有电流项,由此可知电流对电磁力及电磁冲量有着重要影响,因此,通过结构设计增大放电电流是提升推力器电磁加速效果的一种途径。

电磁力除了受到电流的影响,还与电感梯度 L_p' 成正比^[15]

$$F_{EM} \propto L_p' J^2 \quad (4)$$

式中 $L_p' = \Delta \bar{L}_p / x_p$, $\Delta \bar{L}_p$ 为平均电感变化量, x_p 为电流片在 x 方向上的位置,下标 p 表示等离子体。电磁冲量是电磁力对时间的积分,因此推力器的电磁冲量性能受到电感梯度的影响。 $\Delta \bar{L}_p$ 可由磁通量推导出,表示为^[5]

$$\Delta \bar{L}_p = \mu_0 \int_0^{x_p} \frac{1}{w} \int_0^{h(x)} \int_0^{w(x)} \frac{1}{2\pi w} \left[\arctan\left(\frac{z}{y}\right) + \arctan\left(\frac{w-z}{y}\right) + \arctan\left(\frac{z}{h-y}\right) + \arctan\left(\frac{w-z}{h-y}\right) \right] dx dy dz \quad (5)$$

因此 L_p' 可表示为真空磁导率与一个无量纲参数

的乘积

$$L_p' = \frac{\Delta \bar{I}_p}{x_p} = \mu_0 S [x_p, h, w] \quad (6)$$

式中 S 是与 x_p, h 和 w 相关的一个无量纲参量, 可见电极回路的电感梯度由电极的结构参数决定。

在放电电路中, 等离子体电阻也会对 PPT 放电特性和推进性能有一定影响。PPT 放电回路可等效为 RLC 串联电路, 由基尔霍夫定律, 回路方程表示为^[15]

$$U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t J dt = J(R_c + R_p) + \dot{J}(L_c + L_p) \quad (7)$$

式中 R_c 和 L_c 分别为电容的电阻和电感, R_p 和 L_p 为等离子体电阻和电感。

除了电磁加速之外, 气动力加速也是 PPT 的加速机制之一, 等离子体在推力器放电过程中受到的气动力 F_g 和推力器的气动冲量 I_g 分别表示为^[16-17]

$$F_g(t) = \frac{A_p \mu_0 J^2}{4.404 w_0^2 v_{crit}} \sqrt{\gamma R T_c} \frac{C_f}{C_m} \quad (8)$$

$$I_g = \int_0^T F_g(t) dt \quad (9)$$

式中 v_{crit} 为阿尔文波临界速度, γ 和 T_c 分别为等离子体的比热比和温度, R 为摩尔气体常数, C_f 和 C_m 是与 γ 相关的系数, 详见文献[17], A_p 为推进剂烧蚀表面积

$$A_p = h_p w_0 / \sin(\alpha/2) \quad (10)$$

式中 h_p 为推进剂高度, 其值等于 h_0 。

3 结果与讨论

3.1 不同推力器电极构型

PPT 的电极间距涉及放电距离、推进剂烧蚀表面积等参数, 是推力器设计的一个重要参数。在不同的推进剂表面附近电极间距 h_0 的条件下, 实验测得的推力器归一化放电电流曲线如图 4 所示, 电极扩张角 β 均为 10° 。可以看出, h_0 的增大使放电电流的峰值降低, 且 h_0 越大, 电流峰值降低的幅度越大。

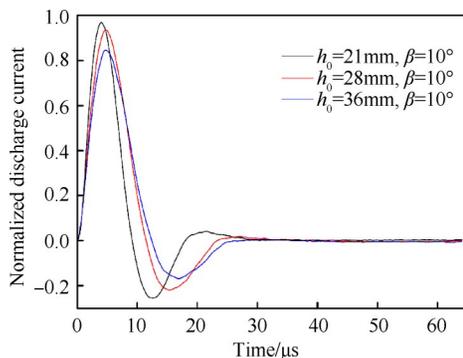


Fig. 4 Discharge current curves of thrusters with different h_0 ($E=68J$)

放电电流与放电过程中等离子体的电阻特性紧密相关, 下面从等离子体电阻的角度开展对比分析。由电容初始电压、电极构型参数及实验测得的放电电流等数据, 结合公式(7), 得出脉冲放电过程中第一个电流正峰时间范围内(约为 $t=0\sim 9\mu s$)在不同平行段电极间距 h_0 条件下的等离子体电阻 R_p , 如图 5 所示。在 $t=1\mu s$ 之前和 $t=8\mu s$ 之后, 对照放电电流曲线(图 4), 此时电极间的电流很小, R_p 极大, 因此超出了图 5 坐标的电阻范围。在 $1\sim 6.5\mu s$ 内, 当推力器的 h_0 较大时, R_p 也相应较大; 而在 $6.5\mu s$ 之后, 此趋势发生改变, 这是由于 h_0 的增大延长了电流波形的振荡周期(如图 4), 导致在较大的 h_0 条件下, R_p 曲线在 $6.5\mu s$ 后发生了滞后的现象。因此, 总体而言, 减小 h_0 可以使放电室内等离子体电阻减小, 从而增大放电电流的峰值。

根据实验测试的放电电流, 结合公式(1)~(3), 估算 PPT 在不同推进剂表面电极间距 h_0 条件下的电磁冲量, 如图 6 所示。由图可知, 在三种电极间距中, $h_0=28mm$ 时推力器获得了较大的电磁冲量, 当 h_0 过大时, 推力器产生的电磁冲量下降。虽然在 h_0 由 $21mm$ 增大到 $28mm$ 时电磁冲量略有提升, 但是由于在这个过程中放电电流峰值减小, 使电流产生的自感磁场减弱, 从而减小了等离子体受到的洛伦

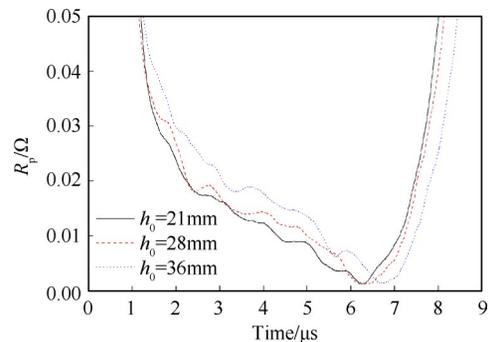


Fig. 5 Plasma resistance with different h_0

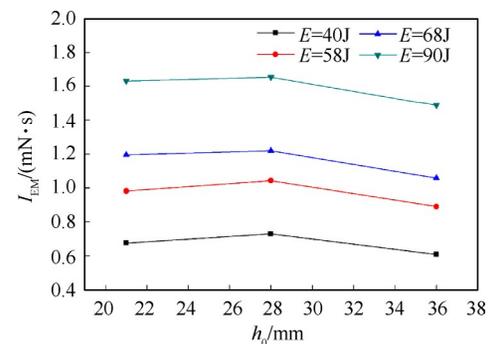


Fig. 6 Electromagnetic impulse bit of thrusters with different h_0 ($\beta=10^\circ$)

兹力,影响电磁加速的效果,因此参数 h_0 应适当减小。

文献[4]仿真结果表明,放电电流的增大使系统内能增大,使得等离子体获得的加速量有限,所以单纯靠增大电流难以持续提高推力器的性能,因此,仍需结合其他方法。根据公式(4),电磁力与电感梯度成正比,故可以采用提高推力器电感梯度的方法进一步提升推力器的电磁冲量。由公式(6)可知,电感梯度与电极构型参数 h 和 w 有关,以图3的舌形扩张电极为例($h_0=21\text{mm}$, $w_0=20\text{mm}$, $\beta=10^\circ$),放电室下游扩张段电感梯度随高宽比 h/w 的变化如图7所示。电流片在放电室内 x 方向的位置从上游向下游变化,随着 h 的增大和 w 的减小,其比值 h/w 增大,电感梯度随着 h/w 的增大而增大。由于增大电感梯度能够提升电磁冲量,因此,在PPT的构型参数设计中,可以通过增大高宽比来提升电磁冲量。

由以上分析可知,为了提升放电电流峰值,需要通过减小 h_0 以减小等离子体电阻,但这样的设计会使电极高宽比参数减小,制约电感梯度的提升,从而对电磁加速产生不利的影响。因此,难以在增大电流峰值的同时提升电感梯度。放电电流峰值的增大和电感梯度的提高看似相互矛盾,但由于放电电流集中在推进剂烧蚀表面的附近^[18],主要受到放电室上游电极间距的影响,因此,可以在空间上将电流和电感梯度这两项影响性能的因素分离,将放电室分为上游段和下游段两部分。如图8所示,结合以上分析推断,在放电室上游采用平行电极结构,适当减小 h_0 ,可以保持较高的电流幅值;在下游采用扩张的电极结构,增大扩张角使下游段的 h/w 增大,可以提升电感梯度。由此,便可兼顾放电电流峰值和电感梯度,从而有效地提升推力器元冲量。

下面对以上分析进行验证。在保持 $h_0=21\text{mm}$ 不变的条件,针对不同的推力器电极扩张角,开展放电电流特性的测试。如图9所示,当 β 由 10° 增大到 20° ,电

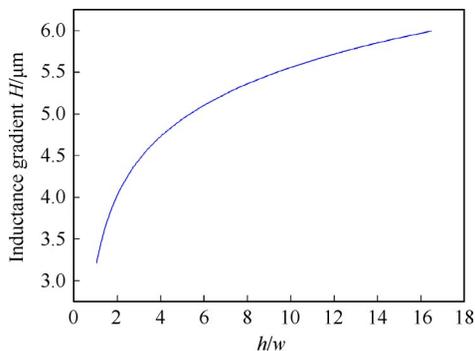


Fig. 7 Inductance gradient changing with h/w

流的峰值基本未受到下游电极扩张角变化的影响。

根据放电电流测试结果,可预估推力器在不同电极扩张角 β 条件下的电磁冲量。如图10所示,电磁冲量随 β 的增大而提升。由前述分析可知,放电电流主要集中在推进剂烧蚀表面附近,电流峰值主要取决于放电室上游段电极间距,下游段电极扩张角

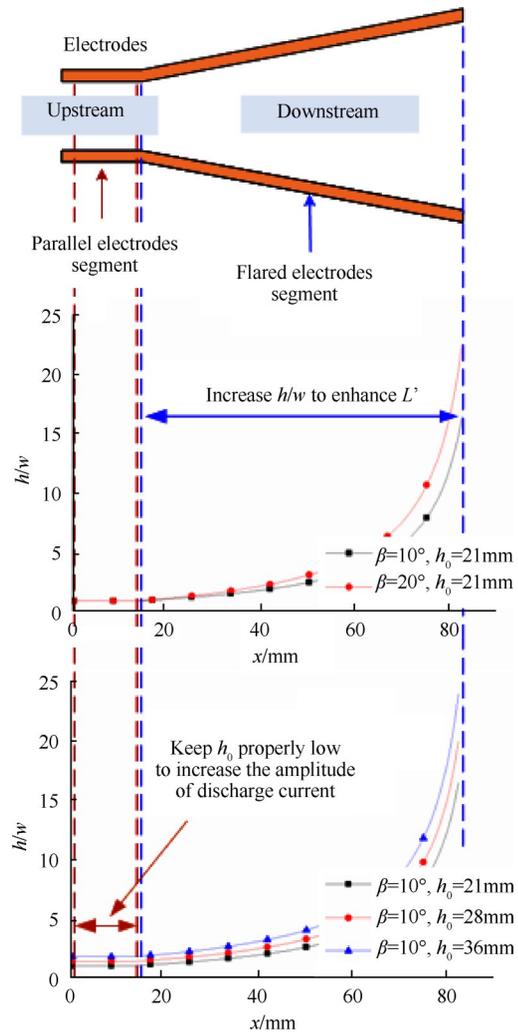


Fig. 8 Schematic diagram of the electrode configuration corresponding to h/w

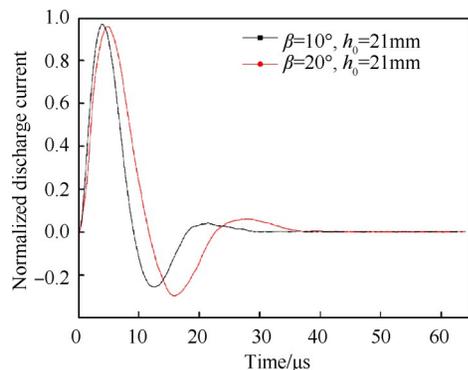


Fig. 9 Discharge current curves of thrusters with different electrodes flared angle β ($E=68\text{J}$)

的大小基本不影响放电电流峰值,由于电极扩张角的增大,电极高宽比增大,电感梯度随之提升,从而使电磁冲量呈增大的趋势。因此,将放电电流与电感梯度在空间上分离的方法能够有效地综合提升推力器的电磁冲量。

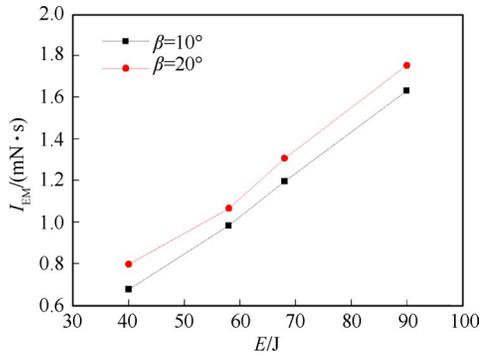


Fig. 10 Electromagnetic impulse bit of thrusters with different electrodes flared angle β ($h_0=21\text{mm}$)

3.2 不同推进剂表面构型

推进剂烧蚀表面是PPT放电室的重要组成部分。根据公式(8),增大推进剂烧蚀表面积 A_p 能够提升气动力 F_g ;而 A_p 与推进剂表面夹角 α 之间的关系由式(10)决定,当 α 为 180° 时,推进剂呈矩形;当 α 小于 180° 时,推进剂表面呈V形, A_p 随 α 的减小而增大。因此,将推进剂设计为V形结构能够增大烧蚀表面积,理论上能够增强推力器的气动力加速效果。

为了研究推进剂烧蚀表面构型对推力器元冲量的影响,针对具有V形和常规矩形两种型面特征的推进剂进行试验和对比分析。推进剂构型如图11所示,其中本文所使用的V形推进剂的表面夹角为 $\alpha=56^\circ$ 。

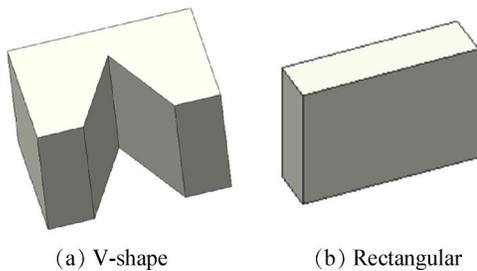
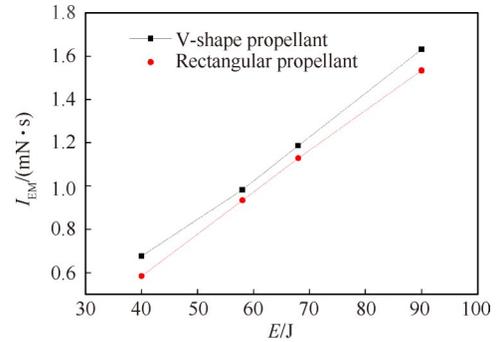


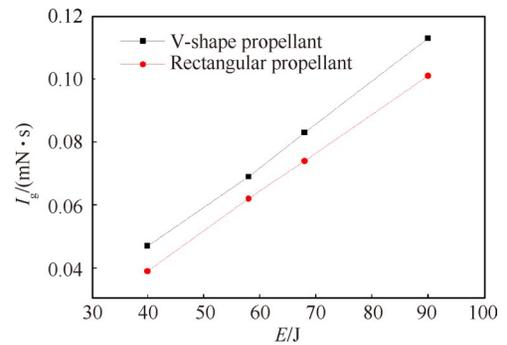
Fig. 11 Schematic of propellant surface features

针对具有图11所示两种推进剂型面的推力器,在电极构型参数均为 $h_0=21\text{mm}$, $\beta=10^\circ$ 的条件下,开展放电实验,由测试采集的电流数据及公式(1)~(3)可估算电磁冲量参数。如图12(a)所示,具有V形推进剂的PPT电磁冲量略高于矩形推进剂的PPT,平均

提升了8%。对比推力器在两种推进剂表面构型条件下的气动冲量,如图12(b)所示,V形型面的推力器气动冲量相对于矩形型面平均提升了14%,型面特征的改变对气动冲量的影响较为显著。



(a) Electromagnetic impulse bit



(b) Gas dynamic impulse bit

Fig. 12 Impulse bit curves of thrusters with different surface features of propellant ($h_0=21\text{mm}$, $\beta=10^\circ$)

与矩形推进剂相比,一方面,V形推进剂与电极构成一个腔体,使烧蚀气体集中在腔体内,加强了气动加速的效果;另一方面,V形推进剂的构型使烧蚀表面积增大,这会使得放电过程中推进剂与电弧接触面积增大,有利于增大烧蚀供给,进一步提升元冲量。

4 结论

通过本文研究,得出以下结论:

(1)增大电极高宽比可提高电感梯度,使电磁冲量得到提升;而增大推进剂表面附近的电极间距使放电电流峰值降低,影响等离子体的电磁加速效果。

(2)采用在放电室上游适当减小电极间距、在下游增大扩张角的结构,可以在空间上将推力器放电电流与电感梯度分离,兼顾了推进剂表面附近电极间距的减小与电极高宽比的增大,综合地提升了推力器的电磁冲量。

(3)相比于矩形构型的推进剂,V形的推进剂型

面设计能够进一步增强推力器的气动加速效果。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] 于达仁, 乔 磊, 蒋文嘉, 等. 中国电推进技术发展及展望[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 1-11. (YU Da-ren, QIAO Lei, JIANG Wen-jia, et al. Development and Prospect of Electric Propulsion Technology in China[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(1): 1-11.)
- [2] 丁一墀, 刘向阳, 黄昕昊, 等. 脉冲等离子体推力器点火可靠性试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 205-211. (DING Yi-man, LIU Xiang-yang, HUANG Xin-hao, et al. Experimental Study on Ignition Reliability of Pulsed Plasma Thrusters[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(1): 205-211.)
- [3] Arrington L A, Haag T W, Pencil E J, et al. A Performance Comparison of Pulsed Plasma Thruster Electrode Configurations [C]. *Cleveland: 25th International Electric Propulsion Conference*, 1997.
- [4] 尹 乐, 周 进, 缪万波, 等. 脉冲等离子体推力器放电波形设计评估仿真研究[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 490-495. (YIN Le, ZHOU Jin, MIAO Wan-bo, et al. Design and Simulation of the Discharge Current Wave for Pulsed Plasma Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(4): 490-495.)
- [5] Schönherr T, Nawaz A, Herdrich G, et al. Influence of Electrode Shape on Performance of Pulsed Magnetoplasma-dynamic Thruster SIMP-LEX [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(2): 380-386.
- [6] 张 锐. 脉冲等离子体推力器工作过程及羽流特性理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [7] 侯大立, 赵万生, 康小明. 脉冲等离子体推力器的性能分析[J]. 推进技术, 2008, 29(3): 377-380. (HOU Da-li, ZHAO Wan-sheng, KANG Xiao-ming. Performance Analysis of Pulsed Plasma Thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(3): 377-380.)
- [8] Lau M, Herdrich G. Pulsed Plasma Thruster Endurance Operation Stress Testing at IRS [C]. *Washington DC: 33rd International Electric Propulsion Conference*, 2013.
- [9] Lau M, Herdrich G. Plasma Diagnostic with Inductive Probes in the Discharge Channel of a Pulsed Plasma Thruster[J]. *Vacuum*, 2014, 110: 165-171.
- [10] Lau M, Manna S, Herdrich G, et al. Investigation of the Plasma Current Density of a Pulsed Plasma Thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(6): 1459-1470.
- [11] 张 华, 吴建军, 何 振, 等. 极板构型对脉冲等离子体推力器性能影响[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(4): 5-9.
- [12] Krejci D, Scharlemann C. Analytic Model for the Assessment of the Electrode Configuration of a μ PPT [C]. *Denver: 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2009.
- [13] 程笑岩, 刘向阳, 黄启陶, 等. 舌形张角型脉冲等离子体推力器极板结构参数影响仿真研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(3): 226-231.
- [14] Mikellides P G, Henrikson E M, Rajagopalan S S. Theoretical Formulation for the Performance of Rectangular, Breech-Fed Pulsed Plasma Thrusters [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, 35(4): 811-818.
- [15] Jahn R G. Physics of Electric Propulsion [M]. *US: McGraw-Hill*, 1968.
- [16] Henrikson E M, Mikellides P G. Modeling of Ablation-fed Pulsed Plasma Thruster Operation Using a New Approach to the Ablation Process [C]. *Hartford: 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2008.
- [17] 杨 磊, 黄玉平, 汤海滨. 水工质脉冲等离子体推力器的宏观性能[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 790-796.
- [18] Zhang Z, Ren J, Tang H, et al. An Ablative Pulsed Plasma Thruster with a Segmented Anode [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, 27(1).

(编辑:梅 瑛)