

毛细管脉冲等离子体推力器等离子羽流分团现象与等效速度测量*

王亚楠¹, 靳丽云¹, 任林渊¹, 刘彤宇¹, 丁卫东¹, 孙安邦¹, 李林^{2,3}

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

3. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘要: 毛细管型脉冲等离子体推力器采用固态工质, 电热加速机制, 结构简单可靠, 是一种具有应用价值的微纳卫星低功率电推进系统。本文建立电学和光学联合诊断系统, 对毛细管脉冲等离子体推力器等离子体羽流演变过程进行了研究。由于放电电流振荡, 推力器等离子体羽流存在二次建立过程。初始阶段等离子体羽流中主要包含带电粒子组分, 二次建立阶段等离子体羽流主要包含中性成分。利用光电二极管阵列和窄带滤光片建立了飞行时间法, 获得了不同放电电压、腔体内径和腔体长度下等离子体羽流分团的等效速度演变特性。结果表明, 电热加速机制能够使带电组分和中性成分获得较为良好的加速效果 (>10km/s)。在一定放电能量下, 放电腔体长度小于25mm有利于获得较优性能参数。等离子体羽流等效速度结果能够较为准确地反映推力器输出比冲和效率参数变化规律, 可作为推力器输出参数便捷有效的评估手段。

关键词: 毛细管脉冲等离子体推力器; 等离子体羽流; 飞行时间法; 等效速度; 二次建立过程

中图分类号: TM89 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 06-2210063-11

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2210063

Plasma Plume Splitting Phenomena in Capillary Discharge Based Pulsed Plasma Thruster and Equivalent Velocity Measurement

WANG Ya-nan¹, JIN Li-yun¹, REN Lin-yuan¹, LIU Tong-yu¹, DING Wei-dong¹, SUN An-bang¹, LI Lin^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

3. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: The capillary discharge based pulsed plasma thruster adopts solid propellant, electrothermal acceleration mechanism, resulting in a simple and reliable structure. It is of great value in low-power electric propulsion system for micro-nano satellites application. In this paper, an electrical and optical joint diagnostic system was established to study the evolution process of the plasma plume of a capillary discharge based pulsed plasma thruster. Due to the oscillation of the discharge current, a secondary establishment process was observed in

* 收稿日期: 2022-10-19; 修订日期: 2022-12-31。

基金项目: 国家自然科学基金 (52007147); 国家重点研发计划 (2020YFC2201100)。

作者简介: 王亚楠, 博士, 副教授, 研究领域为等离子体推进技术, 脉冲功率技术等。

通讯作者: 丁卫东, 博士, 教授, 研究领域为放电等离子体, 脉冲功率技术。E-mail: wdding@xjtu.edu.cn

引用格式: 王亚楠, 靳丽云, 任林渊, 等. 毛细管脉冲等离子体推力器等离子羽流分团现象与等效速度测量[J]. 推进技术, 2023, 44(6):2210063. (WANG Ya-nan, JIN Li-yun, REN Lin-yuan, et al. Plasma Plume Splitting Phenomena in Capillary Discharge Based Pulsed Plasma Thruster and Equivalent Velocity Measurement [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(6):2210063.)

thruster plasma plume. In the initial stage, the plasma plume mainly contained charged particle components, and neutral components mainly showed up in the secondary establishment stage. The time-of-flight method was established based on photodiode arrays and narrow-band filters, and the equivalent velocity evolution characteristics of plasma plume sub-clusters under different discharge voltages, cavity inner diameters and cavity lengths were obtained. The results showed that the charged components and neutral components were both able to reach a high velocity ($>10\text{km/s}$) under electrothermal acceleration mechanism. With a certain discharge energy, it showed that the discharge cavity length less than 25mm was conducive to obtaining better performance parameters. The plasma plume equivalent velocity results could accurately reflect the variation law of thruster output specific impulse and efficiency parameters, and it could be used as an effective and convenient method for thruster output parameters evaluation.

Key words: Capillary discharge based pulsed plasma thruster; Plasma plume; Time-of-flight method; Equivalent velocity; Secondary establishment process

1 引言

微纳卫星具有研发成本低、扩展能力强、发射方式灵活等优点,在低轨宽带卫星通信系统、气象观测、空间科学实验等领域展现出巨大的应用价值,近年来得到迅猛发展^[1-4]。毛细管放电型脉冲等离子体推力器(Capillary Discharge Based Pulsed Plasma Thruster, CDPPT)采用固体聚四氟乙烯工质,无需储供机构,采用脉冲工作模式,系统简单紧凑、可靠性高,在微纳卫星应用中具有优势^[5]。CDPPT单次放电能量通常在焦耳量级,通过脉冲放电在毛细管腔体中产生初始电弧,烧蚀并电离工质产生等离子体,在电热加速作用下向外喷射产生推力,其输出元冲量可精细调节($\mu\text{N}\cdot\text{s}$ 量级),契合微纳卫星姿轨控制需求,发展前景广阔^[6]。

Kisaki等^[7]实验研究了毛细管长度、毛细管直径对推力器输出元冲量、比冲的影响规律。实验结果表明,随着毛细管长度的增加,推力器元冲量逐渐增加,比冲逐渐减小;随着毛细管内径的增大,元冲量逐渐减小,比冲增加。但受限于实验中选取的参数范围,并未给出最优参数选择方案。CDPPT工作过程涉及脉冲电弧形成、能量沉积、管壁烧蚀、等离子体加速等诸多物理过程在微秒至毫秒量级的相互耦合,其输出推力、比冲、效率等性能参数与各关键物理过程中能量传递特性密切相关。然而,不同于平板式电磁型脉冲等离子体推力器的开放式放电通道,CDPPT放电在封闭腔体内完成,给其工作过程诊断带来困难。岐阜大学 Miyasaka等^[8]利用光学诊断方法及在腔壁上布置狭缝针对CDPPT放电及喷射过程的不稳定现象和滞后烧蚀效应进行了研究。利用朗缪尔三探针获得了喷口外羽流时变的等离子体温

度及密度,发现随放电能量的增大,由于烧蚀作用的增强,电子数密度峰值逐渐增大而电子温度逐渐降低。利用高速相机在轴向及径向方向上对不同腔体长度的羽流发光强度进行诊断,其与主电流及电子密度间存在较强的对应关系。同时利用静电探针、光电倍增管及高速摄像三种手段对羽流喷射速度进行测量和对比,并分析了各方法的优劣。德国斯图加特大学 Matthias等^[9]面向教学卫星在轨机动应用研发了CDPPT,并在3J能量范围内对其特性展开研究。通过实验研究了不同毛细管长度,放电能量对单次烧蚀质量,元冲量的影响规律。此外,密歇根大学 Keidar等^[10-11]、大阪大学 Edamitsu等^[12]分别建立了数值仿真模型分析了在毛细管推力器工作过程中,辐射、黏滞阻力、外回路阻抗等因素造成的能量损耗及等离子体参数变化规律,加深对毛细管推力器工作过程认识具有一定价值。

在前期研究中发现,毛细管推力器输出特性参数与外部回路参数、结构参数存在一定的匹配关系,但现有理论在设计参数对推力器输出参数影响规律的内在机理方面并未给出清晰解释。因此,本文从推力器羽流宏观运动速度表征入手,系统研究毛细管推力器等离子体羽流二次建立过程,分析推力器放电腔体尺寸对二次建立过程的影响规律,通过光电二极管阵列飞行时间法评估了不同组分等离子体团等效速度的演变特性。在此基础上,探讨毛细管脉冲等离子体推力器能量传递基本过程和推力器输出参数变化规律。

2 实验方法

2.1 毛细管推力器

本文研制的毛细管推力器样机结构如图1所示,

整体呈同轴结构,主要由阳极、绝缘护套、毛细管腔体、阴极喷嘴及火花塞等部件组成。阳极和阴极均采用黄铜加工,电极引线与阴阳极间均采用螺纹连接。尼龙绝缘护套通过螺纹与两电极连接,起到电气绝缘与机械支撑的作用,也可保证在相同的推力器结构下根据放电腔体的长度进行有效调节^[13]。实验中,毛细管腔体采用聚四氟乙烯作为工质材料。本文所设计的毛细管型推力器有效工作电压为1.0~3.0kV,远小于毛细管腔体在高真空环境中的沿面自闪络电压。为保证推力器的可靠点火,在阴极喷嘴口处设置SiC半导体火花塞,利用火花塞放电释放初始带电粒子诱发毛细管腔体沿面闪络。火花塞绝缘护套通过螺纹安装在阴极喷嘴上,使阴极喷嘴同时充当火花塞外电极。触发间隙设为1.5mm,保证火花塞能在800V触发电压及20mJ的单次触发能量下稳定放电并诱使主间隙引燃。实验中,选取性能可靠的薄膜电容作为储能电容(EACO Co. Ltd.),容值为2.5 μ F,毛细管腔体内径分别为1,3,5,7,9mm,腔体长度分别为14,16,18,20,25,30,35,40mm。

2.2 实验平台

本文搭建的推力器实验平台如图2所示。实验平台主要由推力器、供电电源、电学测量、光学测量和真空系统等构成。真空系统由直径0.7m、高度0.45m的真空仓和真空泵组构成。实验过程中,保持仓内气压维持在 4×10^{-3} Pa以下量级。推力器本体与主电容采用铜皮紧凑连接,放置在真空仓中。主电

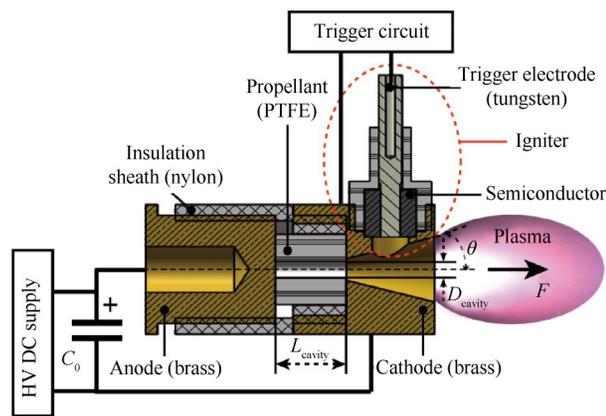


Fig. 1 Schematic of capillary discharge based pulsed plasma thruster configuration

容充电高压直流电源(东文,10kV,5mA),火花塞触发电源(自制,1kV,0.05J),高压探头(Tek P6015A)等测量设备均放置在真空仓外,通过穿仓电极进行充电或信号采集。利用高压探头测量主电容放电电压波形和触发电压波形,利用电流线圈(Pearson 4997)记录毛细管推力放电电流波形。放电波形能够反映推力器主要放电工作过程,同时也作为等离子体羽流演变过程的对照标准。实验中,采用ICCD相机(Andor iStar,最小门宽2ns)对等离子体羽流时空演变过程进行拍摄。ICCD触发时刻通过数字延触发器(DG645)实现与放电波形的同步。推力器等离子体羽流典型发射光谱利用光谱仪(Shamshock 500i,波长分辨率可达0.05nm,波长覆盖范围为190~1000nm)

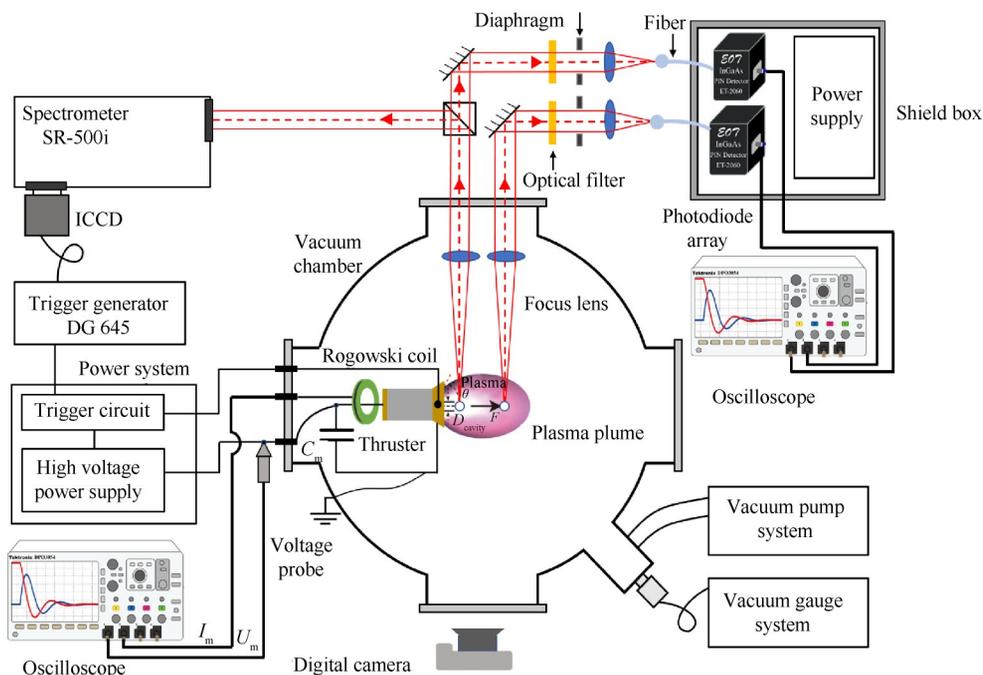


Fig. 2 Schematic of experimental platform

进行收集,采集位置设定在距离喷口平面5mm处。实验中,积分光谱采集时间设定为20 μ s,用于分析判断推力器等离子体羽流中的典型粒子组分,时间分辨率光谱曝光时间设定为100ns,时间间隔100ns,用于表征典型粒子组分的演变规律。推力器输出元冲量、比冲和效率参数通过自研扭摆型微冲量测量台架进行测量^[14],元冲量为10 μ N·s时,不确定度为0.835%,当元冲量为1 μ N·s时,不确定度为3.33%,满足毛细管推力器元冲量测量需求。

为了表征等离子体羽流宏观运动速度,本文建立了基于光电二极管阵列的飞行时间法,如图2所示。实验中在推力器喷口轴向中线方向设置两个测点,一号测点距离喷口5mm,与光谱采集位置保持一致,二号测点与一号测点间距15mm。当等离子体羽流分别经过两个测点时,所检测到光强信号将通过光路分别传输至光电二极管阵列,转化为电信号显示在示波器上。为了与放电时刻进行对应,在进行羽流光强检测时,还同时记录放电电压和电流信号,并一同显示在示波器上,与电流波形信号进行对比分析。根据两个光电二极管信号典型特征的时间间隔和观测点距离,求取等离子体团等效运动速度。通过在光路上布置滤光片,可获得特定波长范围的光强变化规律,表征等离子体羽流中不同粒子组分的等效速度。

为了确定飞行时间法所需窄带滤光片的波段范围,首先获得了毛细管推力器等离子体羽流典型积分光谱如图3所示。实验时,设置光谱仪采集光谱谱线范围为350~780nm,通过对比NIST Atomic Spectra数据库,对辐射强度较高的特征波长的光谱所对应的元素种类进行标注。可以看出,特征谱线主要分布在380~450nm,480~520nm及620~750nm三个波

长范围内,在第一波长范围中主要存在大量的F⁺及少量的C⁺,而在第二宽谱带范围内则主要是谱线强度较为微弱中性的C₂成分,对应于第三波长范围主要存在大量未电离的F原子及少量的C原子和C⁺成分。推力器等离子体羽流中可能还存在CF,CF₂,CF₃等成分,但由于其浓度较低,未能在光谱数据中找到相应谱线。与电磁加速型推力器的羽流积分光谱结果对比,特征谱线基本相似但粒子的电离度明显偏低,缺少高电离度的C⁺和F⁺组分^[15]。

由于不同粒子种类与推力器工作过程能量沉积、电离和加速特性密切相关,因此,可通过施加窄带滤光片表征特定波段光强演化规律。在图3典型光谱积分图像中,主要谱线主要集中在380~450nm,480~520nm及620~750nm三个区域,相对应地,在等离子体羽流飞行时间法测速实验中分别采用了中心波长为430,520和680nm的滤光片,滤光片透过光谱带宽为 \pm 20nm,覆盖三个典型辐射光谱范围。图4(a)所示为结合光电二极管获得不同粒子组分辐射光强。可以明显看到,加入滤光片后,采集光强信号较直接获得的光强信号减弱,同时不同波长光电信号出现时刻有所差异,证明在推力器放电不同阶段羽流中等离子体组分存在差异。图4(b)表示两只光电二极管所采集的典型信号,分别设置光强值2%对应时刻和峰值时刻作为等离子体羽流的典型位置,定义等效速度 v_0, v_1 ,其表达式分别为

$$\begin{aligned} v_0 &= Slt_{0,ab} \\ v_1 &= Slt_{1,ab} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 v_0 表示等离子体端部等效速度, v_1 体现了羽流密度最大点处等效速度。 v_0 与 v_1 差异在一定程度上也反映了等离子体羽流在向外过程中压缩或拉伸。为了减小计算误差,在相同条件下,重复五次实验求平均值。

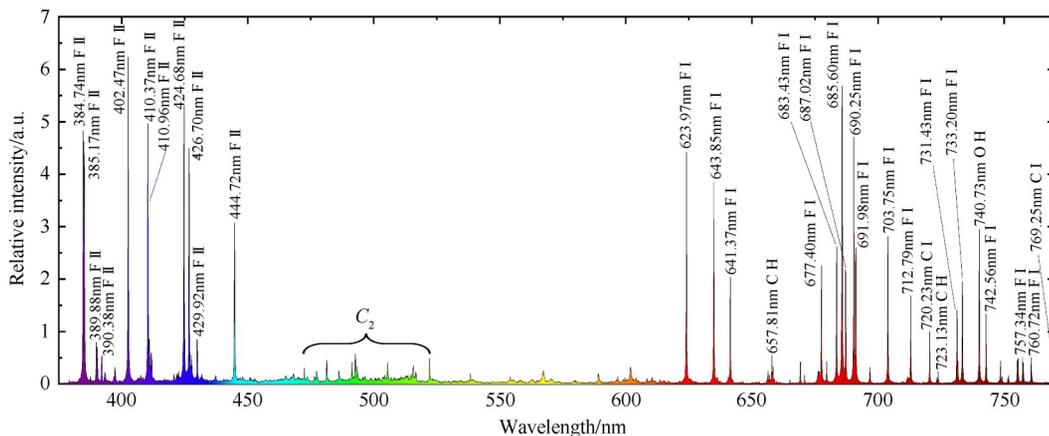
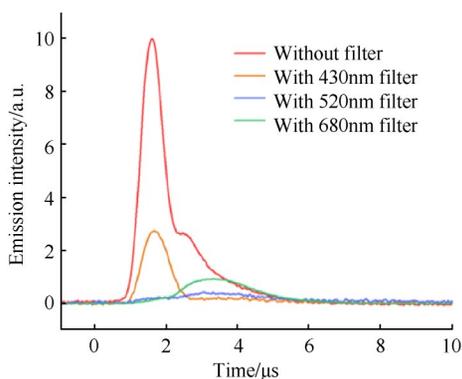
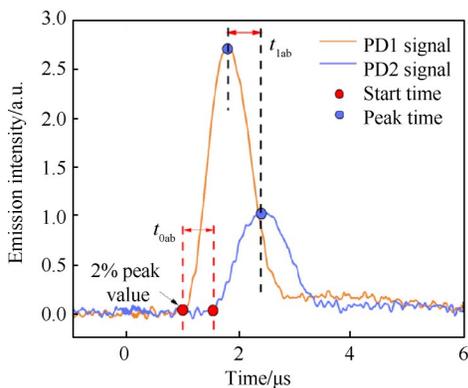


Fig. 3 Typical spectra lines of the capillary discharge pulsed plasma thruster plume



(a) Response of the PD detector with different wave length filter applied



(b) Definition of the velocity of time-of-flight method

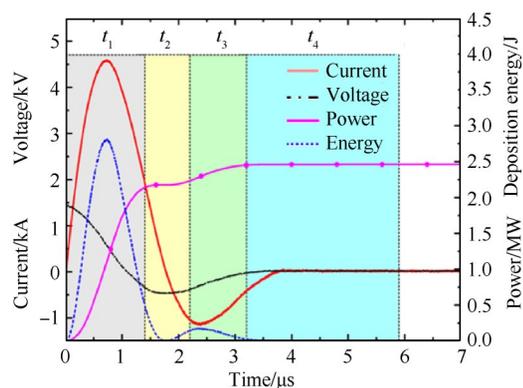
Fig. 4 Schematic of time-of-flight method based on photodiode array and narrow bandpass filters

3 结果与讨论

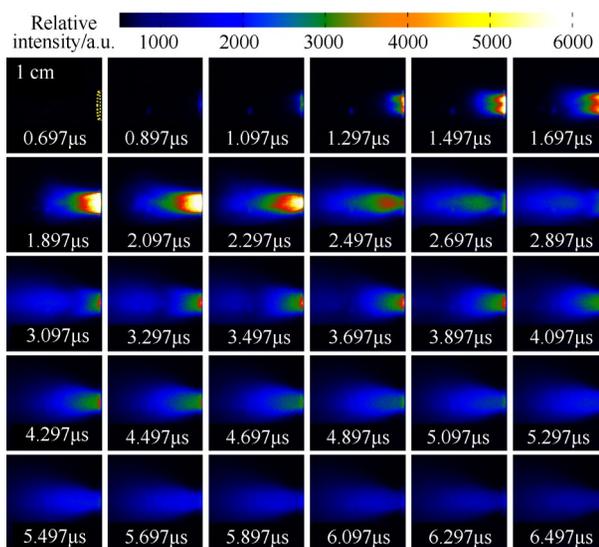
3.1 毛细管推力器等离子体羽流形貌与典型光谱演变

如图 5(a) 所示, 为主电容容值 $2.5\mu\text{F}$, 毛细管腔体内径 16mm , 内径 3mm 时的 CDPPT 典型放电波形, 图 5(b) 为对应的等离子体羽流时间分辨图像。实验中, 推力器放电回路模型可等效为 RLC 电路, 通过对其等效参数进行估算, 该电路工作于欠阻尼振荡模式。从图 5(a) 典型波形可以看到, 放电电压和电流波形存在过零点, 由此导致电弧通道沉积功率和沉积能量曲线存在两个典型阶段。需要指出的是, 放电波形与回路等效参数密切相关, 当增加腔体结构长度、缩小腔体内径或增大主放电电容容值时, 会使得回路等效参数逐渐过渡至临界阻尼振荡或过阻尼振荡阶段, 相应地, 电压电流波形反向过零点将会消失。回路等效放电参数对推力器输出参数的影响规律可参考前期研究工作^[13]。

结合图 5(b) 时间分辨图像可以看到, 在主电流起始约 $0.897\mu\text{s}$ 后, 在喷口处检测到等离子体羽流喷射, 羽流辐射光强逐渐增大, 喷射长度逐渐增长, 该



(a) Discharge curve, deposited power and deposited energy curve



(b) Plasma plume evolution morphology

Fig. 5 Discharge waveform and plasma plume time-resolved image

阶段约维持 $1.4\mu\text{s}$, 对应图 5(a) 中 t_1 阶段所示。由沉积能量曲线可以看出, 在放电电流波形第一个过零点之前, 沉积能量快速增加, 累积沉积能量占总能量的绝大多数, 定义为推力器的快速能量沉积阶段。在 $1.8\mu\text{s}$ 左右, 随着电流的第一次过零, 能量沉积过程进入平台期, 管内等离子体温度及密度迅速跌落, 电热加速效果减弱, 由于速度差异, 等离子体羽流将出现分离现象, 辐射光强将逐渐减弱, 该阶段维持约 $0.8\mu\text{s}$, 如图 5(a) 中 t_2 所示。随着电流过零的完成, 电流反向振荡使得电弧重燃, 能量重新注入, 烧蚀过程开始加强, 在喷口处检测到第二等离子团的喷射, 且随着电流升高注入能量增大, 羽流光辐射强度及喷射长度逐渐增强。但由于反向电流幅值的大幅衰减及沉积能量的减少, 电弧重燃后的羽流强度明显低于 t_1 阶段, 该阶段维持约 $1.0\mu\text{s}$ 左右, 如图 5(a) 中 t_3 所示。随着电流的逐渐归零, 羽流强度逐渐衰减, 喷射长度逐渐降低, 同时在放电结束后数微秒时间内仍能检测到由于滞后烧蚀现象导致的羽流发光现象。

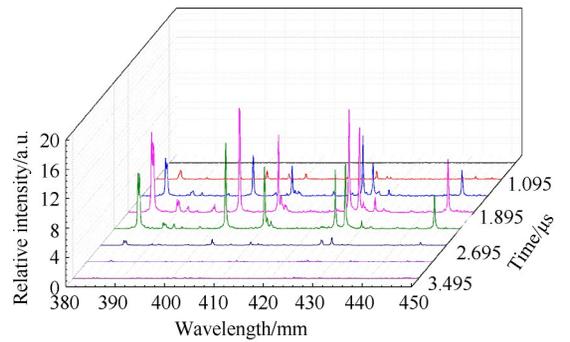
根据喷口外羽流的发展过程可以较为明晰地看到因电流过零前后弧道沉积能量的差异所引起的等离子体分离现象,也可以较好地解释因羽流辐射强度差异引起的图4中光电探测器所测到的光辐射波形的“双峰”现象。

图6(a)和(b)分别为等离子体羽流在380~450nm和620~700nm两个波长范围内的时间分辨光谱,结合图3中标注的典型谱线对应的粒子组分可以看出,在羽流发展前期,主要为一次电离的 F^+ 和 C^+ 。结合前期关于推力器放电特性的研究可知,对应于主放电的能量快速沉积阶段,即可在喷口外检测到第一等离子体团的1.095~2.295 μs 时间内,由于电弧通道沉积能量的充分注入,烧蚀产物可被有效电离,从而在羽流中将存在大量的一价离子。由于该阶段等离子体温度及密度均处于较高的水平,等离子体羽流中退激发/碰撞复合过程粒子密度高,从而使所辐射出可见光的特征谱线的相对强度处于较高的水平,反映为ICCD所拍摄到的较为明亮的等离子体羽流^[16-17]。由于电流的振荡,所有谱线强度均呈现逐渐增大而后降低的趋势,这一点也与羽流辐射亮度的变化规律一致。而随着等离子体羽流分离和反向电弧重燃,在第二等离子体团发射光谱中所存在的离子谱线强度已急剧降低。而由图6(a)可知,在第一等离子体团持续时间内,虽然在其发射光谱中也存在一定的中性离子特征谱线,但其辐射强度相对偏低。而当电弧重燃后,由于注入能量的不足,烧蚀作用随之减弱,羽流中将存在大量的中性原子。且由于等离子体温度下降,谱线的相对强度相较于放电前期显著降低,这也致使第二等离子体的发光强度明显偏弱。相应地,电热加速效应的减弱也抑制了射流长度的进一步发展。此外,根据研究结果不难推断,滞后烧蚀效应和微粒发射在CDPPT中依然存在,从图6(b)中发射光谱的持续时间上可以看到,在主放电完全结束后数微秒时间内(主放电电流持续时间约为4 μs)依然有相当强度的谱线所对应的中性组分喷射。不同于传统电磁型脉冲等离子体推力器中中性组分无法获得有效电磁加速,CDPPT中由于腔体内压力梯度的存在,该部分中性粒子仍有望获得一定的气动加速效果,提升对推力器总体效率和工质利用率的贡献。

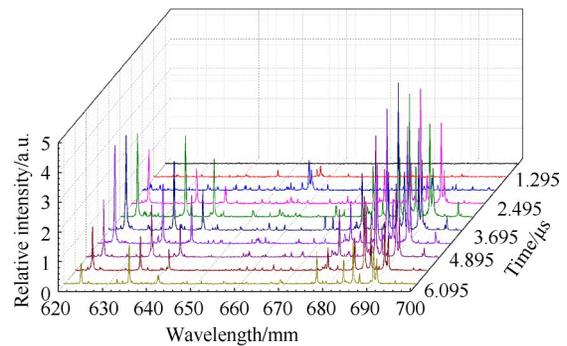
3.2 不同工作参数下毛细管推力器羽流等离子体团等效速度

3.2.1 不同工作电压的影响

图7(a)和7(b)分别给出了不同放电电压下毛细



(a) 380~450nm range time resolved spectra lines



(b) 620~700nm range time resolved spectra lines

Fig. 6 Schematic of time resolved plasma plume spectra lines

管推力器输出等离子体羽流等效速度的变化规律。对于辐射波长为380~450nm波段等离子体团,随着放电电压从1kV增加至2.5kV(对应放电能量从1.25J增加至7.8125J),等离子体团端部运动速度 v_0 从 $2.5 \times 10^4 m/s$ 增加至 $3.2 \times 10^4 m/s$,最大密度对应等离子体运动速度 v_1 从 $1.8 \times 10^4 m/s$ 增加至 $3.8 \times 10^4 m/s$ 。当进一步提高电压至3kV时,等离子体喷射速度 v_0 和 v_1 均有一定程度的下降。对于辐射波长为620~700nm波段等离子体团,随着放电能量的增加,其端部速度 v_0 从 $1.8 \times 10^4 m/s$ 增加至 $3.5 \times 10^4 m/s$ 并保持稳定,而峰值密度位置对应速度 v_1 呈现出减小趋势。

结合图7(c)和7(d)中测量得到的元冲量、等效单次烧蚀质量、比冲结果分析,可以发现推力器输出参数与等离子体等效速度随输入能量变化具备相似的趋势。随着充电电压的增加,单次等效烧蚀质量也不断增大,从 $22.40 \pm 0.15 \mu g$ 增大至 $169.44 \pm 0.26 \mu g$ 。尽管等离子体团等效速度并非随着输出能量单调线性变化,但等离子体羽流中粒子速度与质量的积分持续增大,对应元冲量从 $63.1 \pm 6.1 \mu N \cdot s$ 增加至 $793.8 \pm 11.8 \mu N \cdot s$ 。相比较而言,比冲与效率参数与等离子体团速度呈现出较为一致的变化趋势。当电压从1kV增加至1.5kV时,比冲从287.3s迅速增加至450.8s;当电压继续增加至2kV时,比冲达到最大值509.5s。相

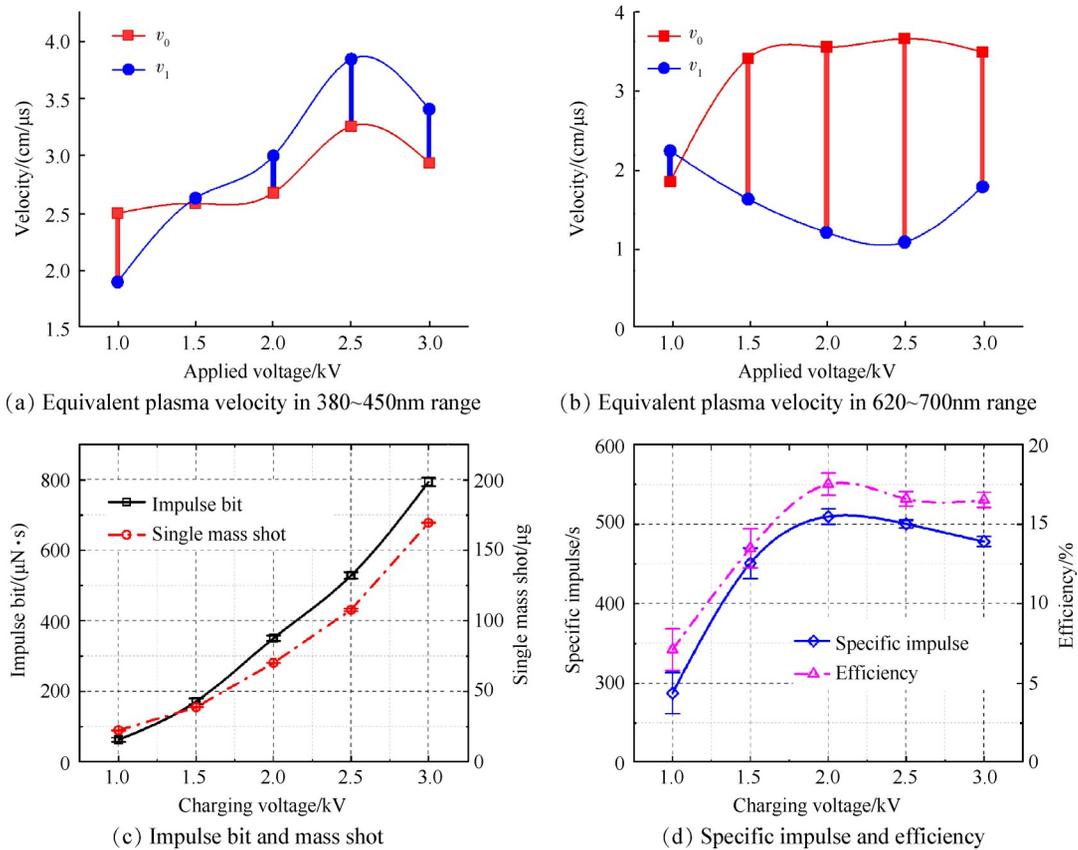


Fig. 7 Influence of the applied voltage on the CDPPT output parameters

对应地,等离子体羽流中380~450nm波段光谱对应组分等效速度 v_0, v_1 也不断增大。随着放电能量的进一步增大,等离子体羽流380~450nm波段光谱对应组分等效速度达到最大值后降低,而620~700nm波段光谱对应粒子组分 v_0 逐渐趋于稳定, v_1 先减小后增加,上述两种变化趋势共同导致比冲参数基本保持不变。推力器总体效率与比冲参数变化相似。当充电电压为2kV时,推力器总体效率达到17.5%。随着放电能量的进一步增加,推力器总体效率趋于稳定。

3.2.2 不同腔体内径的影响

图8(a)为不同毛细管内径尺寸下,推力器等离子体团等效速度的变化规律。实验中发现,随着毛细管内径的增加,毛细管推力器羽流光谱中380~450nm波段辐射光强逐渐减弱,当内径大于3mm时,该波段范围光强难以被光电二极管有效检测。其原因在于,随着腔体内径的增加,烧蚀质量减小,腔体内部等离子体密度不断下降,同时,弧道沉积能量降低,使得粒子碰撞电离过程减弱,一价电离粒子数减小,对应波长范围光辐射强度降低。因此,本文只计算了620~700nm波长等离子体团等效速度随毛细管腔体内径的变化规律。从图中可以明显看出,随着毛细管腔体内径的增加,等离子体团喷射速度 v_0 从 $2.6 \times$

10^4 m/s逐渐降低至 0.75×10^4 m/s, v_1 从 1.55×10^4 m/s降低至 0.8×10^4 m/s后略微增大至 1.2×10^4 m/s。增大毛细管腔体内径降低了放电腔体内部压强,使得等离子体热膨胀加速效果减弱,等离子体喷射速度降低。

从图中可以看到,随着毛细管内径的增大,620~700nm波段对应等离子体团宏观速度 v_0 与 v_1 差异逐渐减小,结合ICCD所拍摄的羽流演变图像可知,当毛细管内径逐渐增加时,羽流二次建立过程消失。放电电流第一个半周期内沉积能量难以实现对等离子体的有效加速,当且仅当烧蚀产物在放电腔体中积聚至一定压强后,等离子体才可形成喷射,此时喷射等离子体速度将近似相等。当增加内径时,由于烧蚀质量和等离子体喷射速度均不断下降,元冲量将呈现下降趋势。对于620~700nm波段等离子体团速度而言,增大内径将使其等效速度不断降低,这与测量得到比冲变化规律一致。当毛细管内径为1mm时,尽管较小的腔体内径可以提供良好的电热加速效果,但由于烧蚀质量的大大增加,使得对应380~450nm波段等离子体团加速效果减弱,在一定程度上导致了其小于毛细管内径为3mm时比冲参数。

图8(b)和(c)给出了不同内径下毛细管推力器输出参数变化规律。当毛细管内径从3mm增加至

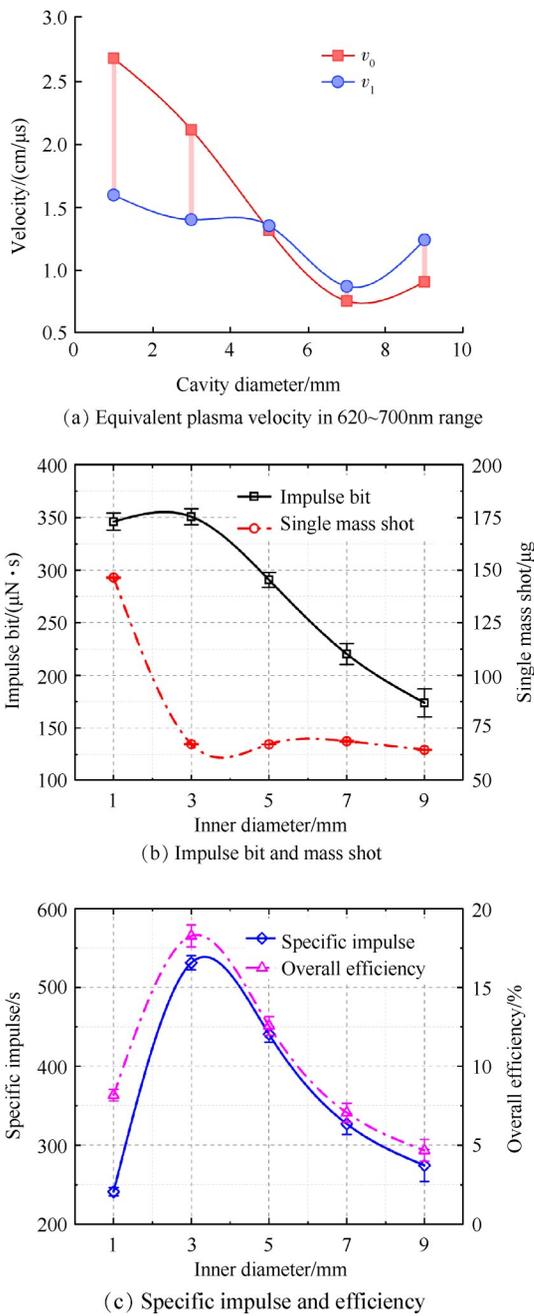


Fig. 8 Influence of inner diameter on CDPPT output parameters

9mm时,输出元冲量从 $350.8 \pm 7.5 \mu\text{N}\cdot\text{s}$ 降低至 $173.9 \pm 13.3 \mu\text{N}\cdot\text{s}$ 。毛细管内径在此范围内变化时,平均单次烧蚀质量近似保持不变,基本维持在 $60 \mu\text{g}$ 左右。随着毛细管内径增大,等离子体等效阻抗减小,放电电流峰值不断增加,但弧道沉积能量不断减小。毛细管内径的增加,使得腔体内等离子体的热膨胀加速作用减弱,因而推力器输出元冲量不断下降。当毛细管内径从 1mm 增加至 3mm 时,元冲量近似不变,但单次平均烧蚀质量迅速从 $146.48 \pm 0.34 \mu\text{g}$ 减小至 $67.4 \pm 0.29 \mu\text{g}$ 。实验中发现,当毛细管内径为 1mm 时,

推力器工作过程中甚至出现熄弧现象。电容中存储能量未完全释放,实际单次放电能量较小,使得输出元冲量与腔体内径 3mm 时元冲量较为接近。由于烧蚀质量的迅速减小,使得比冲参数从 241.1s 增加至 531.1s,总体效率从 8.2% 增加至 18.3%。当毛细管内径继续增加时,由于元冲量不断下降,单次烧蚀质量近似保持不变,使得计算所得比冲参数随着毛细管内径增加从 531.1s 降低至 274.4s,总体效率从 18.3% 下降至 4.7%。结合图 8(a) 与 (c) 可以发现,等离子体团等效运动速度呈现出与比冲和总体效率参数较为一致的变化趋势。

3.2.3 不同腔体长度的影响

图 9(a) 和 (b) 为不同毛细管长度时,380~450nm 波段和 620~700nm 波段对应光辐射强度的变化规律。增大腔体长度时,380~450nm 波段对应宏观等效速度 v_0, v_1 均呈现出先增大后减小的趋势,在 18mm 时达到最大值。随着腔体长度的增大,不同波段辐射强度均不断下降,当腔体长度大于 30mm 后,羽流中 380~450nm 波段辐射光强已无法被有效测量。进一步分析等离子体团等效速度 v_0 与 v_1 差值,对于 380~450nm 波段,当腔体长度小于 20mm 时,两个典型速度差值近似维持不变;当腔体长度大于 20mm 并进一步增加时,速度差值逐渐减小最终近似相同。相对应地,从 620~700nm 波段光辐射对应的等离子体团速度可以看到, v_0 始终低于 v_1 , 这意味着在放电初始阶段沉积能量所建立起来的腔体内部压强未得到充分利用。等离子体羽流二次建立过程仍需要通过进一步烧蚀累积才能实现中性组分的加速,降低了等离子体的加速效率,不利于总体效率的提升。

对比图 9(c) 和 (d) 中不同腔体长度毛细管推力器输出元冲量,单次烧蚀质量,比冲和总体效率的变化趋势可以看到,380~450nm 辐射波段对应等离子体羽流等效运动速度与比冲和效率参数呈现较为一致的规律。随着毛细管长度的增大,推力器输出元冲量先增大后保持在一定范围内波动。平均单次烧蚀质量随着毛细管长度的增加持续增大。随着腔体长度的增大,等离子体在腔体中受到电热加速作用的距离增大,腔体出口处等离子体喷射速度将会提高,因而比冲和效率随着腔体长度的增加迅速上升。当长度为 18mm 时,比冲为 468.9s,效率为 13.4%,均到达最大值。随着腔体长度进一步增大,等离子体的喷射速度难以继续提高,因此元冲量呈现饱和趋势。由于单次烧蚀质量持续增大,推力器比冲和效率不断下降。

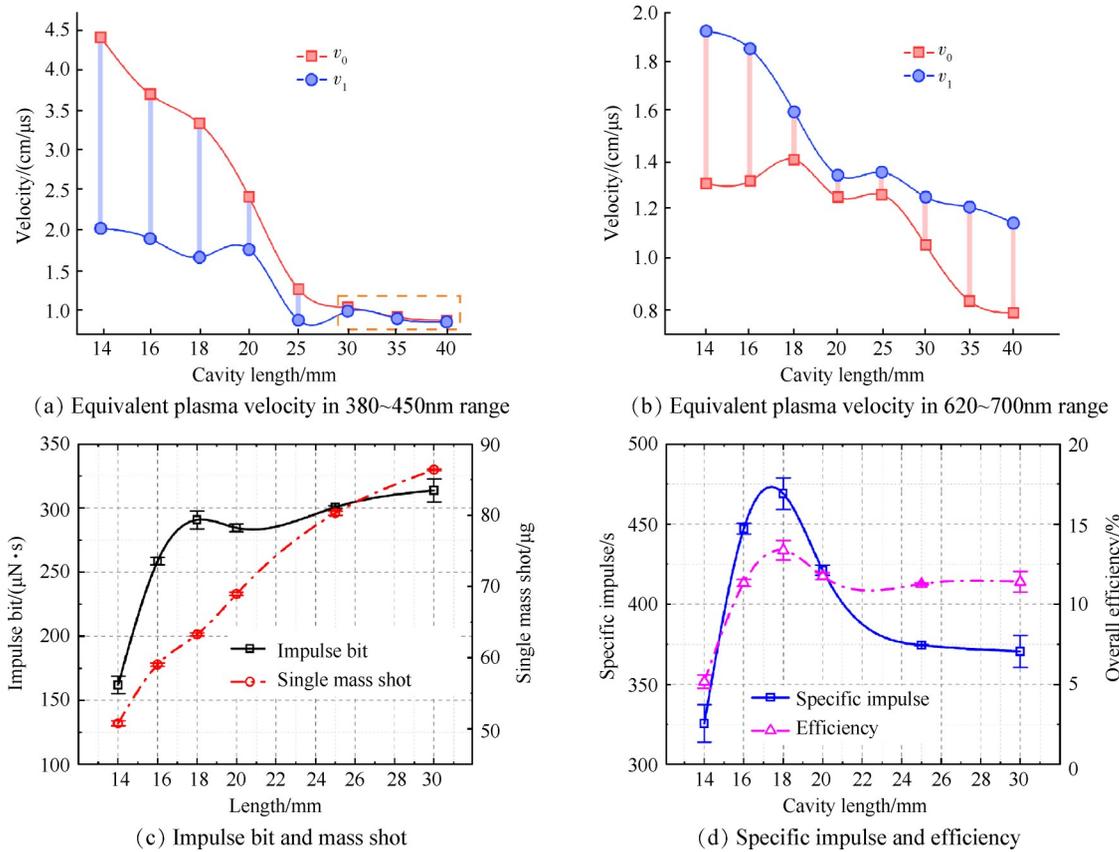


Fig. 9 Influence of cavity length on CDPPT output parameters

从上述实验结果可知,利用基于光电二极管阵列的飞行时间法可以获得对应不同波长范围等离子体团等效宏观速度,等效速度通常在数十千米每秒量级。比冲参数在一定程度上反映了等离子体平均喷射速度,然而根据测量元冲量及等效烧蚀质量计算,其结果小于1km/s。其原因在于,在放电结束后,管壁将持续维持较高温度,热分解蒸汽和微粒向外喷射产生推力。该部分粒子速度通常较小,维持在数百米每秒量级^[18]。该中性成分不存在退激发的光辐射过程,难以被光电二极管阵列探测,需要借助其它光学诊断手段进行测量。

3.3 毛细管推力器等离子体羽流建立过程及性能参数影响机理

脉冲等离子体推力器工作过程本质上是将电容储存电能向等离子体动能的转化过程,其中脉冲等离子体电弧是能量转化过程的重要载体,其特性参数和行为也直接体现和决定了脉冲等离子体输出参数。结合前期毛细管脉冲等离子体推力器羽流诊断的相关研究,可将推力器典型工作过程划分为四个典型阶段,如图10所示。

在初始放电阶段(图10(a)),腔体内由火花塞放电释放初始带电粒子诱导形成沿面放电,储能电容存储能量向腔体内部放电电弧释放,电弧通道逐步

建立。随着放电电流的不断增大,向腔壁不断辐射热量,烧蚀过程逐渐建立。从对应的能量沉积曲线也可以看出,此阶段能量传递过程尚未完全开始。在此阶段,由于腔体内烧蚀产物较少,腔体内部压强较低,等离子体电热加速作用较弱,羽流喷射过程存在不稳定性,从羽流图像中可以观察到不稳定的压力波特征^[19]。在放电过渡阶段(图10(b)),随着放电电流的持续增大,由管壁烧蚀产生的等离子体密度不断增加。由于弧道能量不断累积,相对应的焦耳热持续增加等离子体内能,使得毛细管腔体内等效压强增加,等离子体喷射速度增大。对应的羽流图像可以看到该阶段羽流形貌均匀稳定,喷射距离较远。能量沉积曲线也表明,大部分能量沉积主要集中在该阶段。结合等离子体团速度诊断结果,该阶段等离子体密度较高且等效速度较快,是推力器输出元冲量的主要贡献阶段。

如图10(c)所示,当放电电流波形经过零点并逐渐达到反向峰值,毛细管推力器将经历放电重建阶段。由于管壁仍可保持较高的温度,烧蚀过程将持续进行。然而,电流振荡将影响腔体内等离子体的能量沉积过程,使得等离子体加速过程存在波动。相对应地,推力器羽流图像可以观察到明显的二次建立过程。该阶段由于电极间放电电压较低,等离

子体电离过程受阻,主要为中性组分。然而,由于腔体内仍维持较高的压力梯度,可对中性组分产生加速效果。当放电电流归零后,毛细管管壁仍会在潜热作用下持续烧蚀向外喷射,由于毛细管腔体内部难以维持较高的压力梯度,该阶段等离子体喷射速度较低,该阶段为滞后烧蚀阶段(如图10(d)),对提高推力器比冲参数和工质利用率不利。

结合推力器的工作过程,可以对放电能量、腔体尺寸参数对输出参数的影响机理进行分析。等离子体的宏观运动速度反映了电热加速的效果,提高等离子体运动速度有助于提高推力器等效比冲参数和总体效率。沉积能量过程主要完成在电流波形的第一个半周期,然而烧蚀过程和腔体压强增加过程将滞后于能量沉积过程,当放电电流幅值逐渐减小后,电离过程减弱,中性分子产物产生,此时粒子在腔体内热压的作用下,仍可获得较好的加速效果,喷射速度较大。然而,随着放电电流的进一步减小,材料表面热分解持续进行但缺乏能量的充分注入,且此时仅能依靠较小的压力梯度作用喷出。随着放电能量增加,增大了烧蚀质量,有助于提升等离子体电热加速效果。然而,进一步增加放电能量时,430nm等离子团对应等效速度有所下降。根据前期沉积能量特性研究结果可知,随着放电电压进一步提升,电弧等离子体电导率提升,使得毛细管等离子体等效电阻减小,降低了能量沉积效率。虽然烧蚀质量进一步提升,但分配用于烧蚀产物加速能量部分有所降低。

在腔体结构参数实验中,从羽流图像ICCD图像发现,当增加腔体长度或腔体内径时,等离子体喷射

时刻相较于放电起始时刻的延时时间不断增加,这意味着由于毛细管长度增大或内径增大,放电快速能量沉积阶段所产生的烧蚀质量不足以实现腔体内等离子体电热加速所需的压力梯度,等离子体加速过程滞后,致使毛细管内能量沉积过程与加速过程的时间匹配特性变差,降低了电热加速效率。尽管增大放电腔体长度可以提高烧蚀质量,延长推力器推力持续时间,增加推力器输出元冲量。然而,由于持续产生推力过程中,较长放电腔体内压力梯度建立所需时间更长,使得等离子体加速效率降低,在一定程度上降低等离子体喷射速度,不利于比冲和总体效率的提高。对于增大毛细管腔体内径而言,其主要影响了等离子体电热加速过程,将使得加速过程滞后于放电和烧蚀过程,电弧沉积能量作用于加速过程的比例降低,使得推力器等离子体喷射速度下降,元冲量减小,比冲降低,总体效率下降。

对于毛细管型脉冲等离子体推力器而言,由于主要依靠电热加速机制对等离子体加速,中性成分也能获得良好的加速效果,这对于提高工质利用率和总体效率具有重要意义。CDPPT的优化设计可从以下几个方面考虑:

(1) 推力器输出元冲量、比冲和效率参数均随毛细管腔体内径的增大而减小。增大腔体长度可以提高推力器平均单次烧蚀质量,当进一步增加毛细管长度,推力器效率和比冲参数逐渐出现饱和趋势。因此,针对特定输出参数的设计时,在选定单次放电能量后,应对腔体长度和内径进行优选,获得最佳结构参数选取范围。

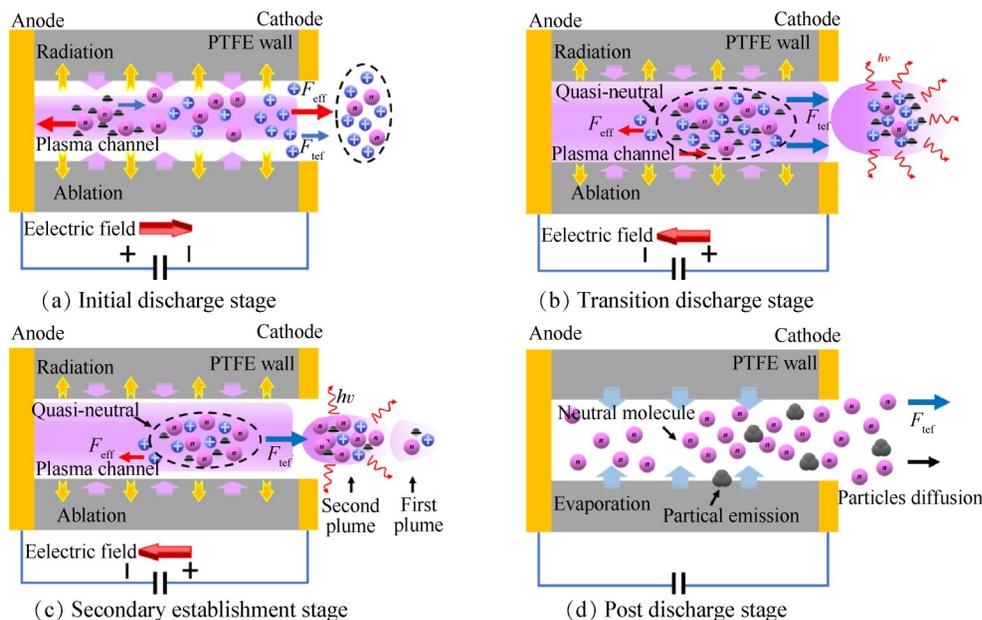


Fig. 10 Schematic of typical process during the CDPPT operation

(2)毛细管推力器总体效率受能量转移效率和等离子体加速效率的共同制约。因此,在进行推力器设计时,还应尽可能降低放电回路中储能单元、功率传输单元、放电电极等部件的等效阻抗,提高放电能量的传递效率,使储能电容中存储电能尽可能多地传递至放电电弧通道中。

(3)由于CDPPT性能参数表征涉及微冲量测量,等效平均烧蚀质量计算等,实验流程较为繁琐。因此,可考虑采用光电二极管阵列的飞行时间法对等离子体羽流速度进行快速获取,锁定关键工作参数范围,提高优化设计效率。

4 结 论

本文通过研究,得到如下结论:

(1)毛细管放电型脉冲等离子体推力器羽流存在二次建立过程,在羽流发展前期,主要包含一价电离的碳离子和氟离子,在二次建立过程主要为中性组分。

(2)等离子体羽流中带电粒子和中性粒子均能获得较好的加速效果,等效运动速度可达10km/s量级。

(3)等离子体团等效运动速度体现了电热加速效果,放电腔体小于25mm有利于获得较优性能参数。

(4)利用基于光电二极管的飞行时间法可以较为便捷地评估毛细管推力器输出参数变化规律,能够帮助实现推力器结构和工作参数的优化设计。

在下一步工作中,将探索通过建立推力器工作过程数值仿真模型,分析推力器工作过程中电容储能向烧蚀、加速、辐射损耗等关键物理过程的传递特性,进一步研究推力器结构设计参数对放电腔体内等离子体参数和输出参数的影响机制。

致 谢:感谢国家自然科学基金、国家重点研发计划、上海空间推进研究所创新基金项目的资助。感谢程乐、葛崇剑对本文实验研究工作的付出。

参考文献

- [1] Levchenko I, Keidar M, Cantrell J, et al. Explore Space Using Swarms of Tiny Satellites[J]. *Nature*, 2018, 562: 185-187.
- [2] 张召才,姜焱. 美国SEI公司发布全球50kg以下微纳卫星市场预测报告[J]. *国际航天*, 2016, 454(10): 1-1.
- [3] 澎湃新闻. 航天科工虹云工程拆解:156颗卫星如何无差别覆盖全球网络[EB/OL]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1779557, 2017-8-31.
- [4] Esper J, Neeck S, Slavin J A, et al. Nano/Micro Satellite Constellations for Earth and Space Science[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52(9): 785-791.
- [5] Levchenko I, Bazaka K, Ding Y J, et al. Space Micropropulsion Systems for Cubesats and Small Satellites: From Proximate Targets to Furthestmost Frontiers[J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(1): 1-15.
- [6] Wright W P, Ferrer P. Electric Micropropulsion Systems[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, 74: 48-61.
- [7] Kisaki S, Muraoka R, Huanjun Chen, et al. Research and Development of Electrothermal Pulsed Plasma Thruster Systems Onboard Osaka Institute of Technology PROITERES Nano-Satellites[R]. *IEPC-2013-097*.
- [8] Miyasaka T, Asato K, Sakaguchi N, et al. Optical Measurements of Unsteady Phenomena on Coaxial Pulsed Plasma Thrusters[J]. *Vacuum*, 2013, 88: 52-57.
- [9] Matthias L, Herdrich G, Fasoulas S, et al. A Thermal Pulsed Plasma Thruster for Microsatellite Propulsion[R]. *IEPC-2011-140*.
- [10] Keidar M, Boyd ID. Device and Plume Model of an Electrothermal Pulsed Plasma Thruster[R]. *AIAA 2000-3430*.
- [11] Keidar M, Beilis II, Boyd I D. Model of an Electrothermal Pulsed Plasma Thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(3): 424-430.
- [12] Edamitsu T, Tahara H. Performance Measurement and Flowfield Calculation of an Electrothermal Pulsed Plasma Thruster with a Propellant Feeding Mechanism [R]. *IEPC 2005-105*.
- [13] Wang Y N, Ding W D, Cheng L, et al. An Investigation of Discharge Characteristics of an Electrothermal Pulsed Plasma Thruster[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(10): 2715-2724.
- [14] Wang Y N, Ge C J, Cheng L, et al. A Torsional Thrust Balance with Asymmetrical Configuration for Microthruster Performance Evaluation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 076111.
- [15] Schönherr T, Nees F, Arakawa Y, et al. Characteristics of Plasma Properties in an Ablative Pulsed Plasma Thruster[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(3): 033503.
- [16] Koizumi H, Noji R, Komurasaki K, et al. Study on Plasma Acceleration in an Ablative Pulsed Plasma Thruster[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 14(3): 033506.
- [17] Markusic T E, Spores R A. Spectroscopic Emission Measurements of a Pulsed Plasma Thruster Plume[R]. *AIAA 97-2924*.
- [18] Spanjers G G, Lotspeich J S, Mcfall K A, et al. Propellant Losses Because of Particulate Emission in a Pulsed Plasma Thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 14(4): 554-559.
- [19] Zhang Z, Schäfer F, Zhang G C, et al. Investigation on Operational Stability of a Pulsed Plasma Thruster with a Pressure Probe[J]. *Acta Astronautica*, 2022(197): 60-68.

(编辑:白 鹭)