新型固体工质脉冲等离子体推力器试验研究*

涂 演[1]，刘向阳[2]，尹诗明[1]，张鲲鹏[1]，陈 川[1]，张 晗[1]

（1. 上海航天控制技术研究所·上海·201109；
2. 北京理工大学 宇航学院·北京·100081）

摘 要：脉冲等离子体推力器（Pulsed Plasma Thruster，PPT）因其推力小、质量小、功率低等特点，被认为是微小卫星执行某些推进任务的电推进装置之一，但其因效率低下，一直为人所诟病。针对这一现状，将聚四氟乙烯（PTFE）掺入质量配比为 2%、5%（6%）、10%和 15%的铜和碳，制成掺铜工质（PTFE-Cu）和掺碳工质（PTFE-C）。在 3 种不同放电能量（1J、1.44J、2.25J）的条件下，测量 PPT 使用这些工质工作时的电压、电流和脉冲烧蚀质量，并根据结果估算 PPT 的元冲量、比冲、效率等推进性能。此外，还基于发射光谱理论，对等离子体的种类、特性进行了诊断研究。研究结果表明，烧蚀质量随掺杂量的增加而增加；元冲量随着掺碳量的增加而增加；PTFE-Cu-10%的元冲量最大，为 56.47（μN·s）；当使用 PTFE-C-2%和 PTFE-Cu-10%时，PPT 的性能最好；掺碳和铜在一定程度上促进了 PPT 的电离过程，进而提高了推力器的效率。

关键词：脉冲等离子体推力器；新型固体工质；性能研究；等离子体特性
中图分类号：V19 **文献标志码**：A **文章编号**：2096-5974(2021)03-0040-08

Experimental Investigation on Pulsed Plasma Thruster with New Solid Propellant

TU Yan[1], LIU Xiangyang[2], YIN Shiming[1], ZHANG Kunpeng[1], CHEN Chuan[1], ZHANG Han[1]

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109;
2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Pulsed plasma thruster (PPT) is regarded as an electric propulsion device for some propulsion mission of micro-spacecraft for its small thrust, light weight and low power. However, it has been criticized for its inefficiency. In view of this situation, adopting polytetrafluoroethylene (PTFE) as the propellant, PTFE is doped with 2, 5 (6), 10 and 15 percent C or Cu to make two new types of propellant as the research object. The discharge voltage and current waveform were recorded, the ablation mass weighted under three different discharge energies (1J, 1.44J, 2.25J), and the impulse bit, specific impulse, efficiency of PPT were estimated based on the results. The species, characteristics of plasma were also detected and diagnosed with the emissive optical spectrometer. The research results show that the ablation mass increases with the increase of the doping amount; the impulse bit increases with the increase of the C dopant, and the PTFE-Cu-10% impulse bit is the largest, which is 56.47 (μN·s); PTFE-C-2% and PTFE-Cu-10% have the best performance in all C and Cu dopant PTFE specimens, and they promote the ionization process to some extent, thereby improving the thruster efficiency.

Keywords: pulsed plasma thruster; new solid propellant; performance research; plasma characteristics

0 引 言

自 20 世纪 80 年代以来，国际上关于微小卫星的相关技术发展迅猛，目前已有诸多国家和地区开展了针对微小卫星的研究工作，其发射数量占卫星发射总数量的比例逐年显著上升[1-2]。随着微

* 收稿日期：2020-03-13；修回日期：2020-05-19
作者简介：涂演（1992—），男，硕士，助理工程师。E-mail：candy42937@qq.com

小卫星技术在通信、导航、气象、探索等诸多航天领域中的发展，微小卫星往往需要一半以上的比重完成推进任务[3]。为了有效拓展微小卫星的技术优势，需要应用体积小、质量小、集成度高的推进系统。同时，微小卫星任务需推力精确、连续可调的推进系统，这对推进系统提出了十分严苛的要求[4]。作为最早应用于航天器的电推进技术[5]，脉冲等离子推进器（Pulsed Plasma Thruster，PPT）因可满足微小卫星对推进系统提出的小质量和低功耗等严苛要求，近年来已成为电推进系统发展的重要方向[6-8]。

长期以来，PPT 低效率的缺陷一直为人所诟病。研究表明，现有的绝大多数 PPT 的效率均低于 10%，低功率 PPT 的效率甚至只有 3%左右[9]。为了改善这一缺陷，提高 PPT 的应用领域，一些学者开始从改善或者替换传统工质（PTFE）的方向进行研究。1970 年，Palumbo 和 Guman 等尝试采用多种不同的塑料材料以及在塑料中掺杂溴化钢、锂化氢等物质，均没有获得优于 PTFE 的性能[10]。1995 年，Leiweke 等人测试了一种由不同厚度 PTFE（$[C_2F_4]\ x$）与 PE（$[C_2H_4]\ x$）组合而成的层状材料，并将其作为工质以改善 PPT 的性能，但二者的热导率差异导致 PE 出现了明显的碳化现象，反而降低了 PPT 的比冲[11]。2001 年，Pencil 等人通过实验比较了将一般 PTFE、高密度 PTFE、多孔 PTFE 以及掺碳工质（PTFE-C）等作为工质时的 PPT 的性能差异，发现一般 PTFE 与高密度 PTFE 的比冲相同，仅 PTFE-C-2%的比冲获得了提高，但当含碳量过高（>10%）时，电极间被击穿[12]。2015 年，Tony Schoenherr 等人采用掺入 4.45%铝和锌的 PTFE 作为 PPT 工质，进行了实验，但 PPT 性能没有得到显著提升[13]。这些试验研究未能找到能够提升 PPT 性能的工质，并从机理上分析出该工质是如何提高 PPT 性能的。

PPT 工质电离率低是其效率低的主要原因之一。过去的研究表明[8]，由 PPT 烧蚀出的工质只有部分被电离，不能被电离的工质无法被电磁加速，其喷出速度低于 300（m/s），远低于等离子体喷出速度（20（km/s）以上），几乎可以忽略不计。工质电离率低导致大量工质浪费，从而使 PPT 效率低下。本文论述以 2%、5%（6%）、10%和 15%的碳或铜掺入 PTFE，制成新工质，以研究 PPT 的性能。本文通过对新工质烧蚀过程的放电电压、放电电流、烧蚀质量、发射光谱的测量，估算其元冲量、比冲、效率等推进性能。结合理论计算，分析试验结果，总结新型工质的性能及机理。

1　试验研究方案

1.1　试验工质

为了提高 PPT 的性能，同时不给 PPT 脉冲放电工作环境带来新的组分粒子，本研究选用第一电离能较低的碳和铜元素的物质作为掺含物。选用的工质是将石墨粉或铜粉与聚四氟乙烯按照质量比进行均匀混合制成的工质块，新型固体工质掺碳聚四氟乙烯（PTFE-C），百分比分别为 2%、6%、10%、15%；掺铜聚四氟乙烯（PTFE-Cu），百分比分别为 2%、5%、10%、15%。掺入的石墨粉和铜粉的直径大小为 10μm 左右。

1.2　试验方案

本研究所测试的样机为平行板型脉冲等离子体推力器，推力器参数如表 1 所示。

表 1　PPT 样机参数

Tab. 1　PPT prototype parameters

参数	参数状态
最大工作电压/V	2000
电容容量/μF	2±5%
电极长度/mm	14
电极宽度/mm	12
电极厚度/mm	4
正负电极间距/mm	25

本研究选用了 1000V（1J）、1200V（1.44J）和 1500V（2.25J）的放电电压。由推力器在 3 种工况下工作 500 次，测量推力器的放电电压、放电流量和总工质烧蚀量，并在 1500V 放电电压下测量由工质烧蚀出的等离子体的光谱波长强度。其中，放电电压由安捷伦 10076B 高压探头（最大输入电压为 4000V，带宽为 250MHz）测量，放电电流由罗柯夫斯基线圈（量程为 10MA～500kA，采样频率为 10MHz）测量，总烧蚀质量由赛多利斯 CPA225D 型高精度电子天平（测量精度为 0.01mg）测量，等离子体光谱强度由赛凡光电 7ISW30 系列型三光栅扫描单色仪（光谱波长量程为 300nm～1250nm）测量。

2 数值计算模型

2.1 推进性能计算模型

由于不能准确测量微牛级推力，需要对 PPT 的推力性能进行估算。在过去的 PPT 的试验研究中，在没有足够精度的推力台时，均利用 PPT 的放电电流以及粒子排出速度来估算元冲量。对于 PPT 而言，元冲量与粒子的质量和排出速度有关。本研究在估算 PPT 元冲量时，将等离子体和中性气体产生的冲量进行了相加，故本文采用下式[14]估算元冲量

$$I_{\mathrm{bit}}=I_{\mathrm{em}}+I_{\mathrm{g}} \tag{1}$$

其中，I_{em}表示等离子体加速产生的冲量，I_{g} 表示中性气体产生的冲量，两者的表达式分别如下

$$I_{\mathrm{em}}=m\beta V_{\mathrm{em}} \tag{2}$$

$$I_{\mathrm{g}}=m(1-\beta)V_{\mathrm{g}} \tag{3}$$

其中，m 为烧蚀质量，β 为工质电离率，V_{em} 为等离子体排出速度，V_{em} 假设为 40000m/s，V_{g}为中性气体排出速度，V_{g}大小为 3000m/s[15]。

将式（2）、式（3）代入式（1），可以得到如下的元冲量表达式

$$I_{\mathrm{bit}}=I_{\mathrm{em}}\left(1-\frac{V_{\mathrm{g}}}{V_{\mathrm{em}}}\right)+mV_{\mathrm{g}} \tag{4}$$

其中，等离子体由加速产生的冲量与放电电流平方的积分成正比，故其表达式又可表示为

$$I_{\mathrm{em}}=\frac{\mu_0 h}{2w}\int_0^{t_e} I^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{5}$$

其中，μ_0 为真空磁导率，$I(t)$ 为 t 时刻电路中的电流，t_e 为放电结束时刻，h 和 w 分别为极板间的高度和极板宽度。

计算得到元冲量后，计算比冲

$$I_{\mathrm{sp}}=\frac{I_{\mathrm{bit}}}{mg} \tag{6}$$

推力器效率计算公式如下

$$\eta_{\mathrm{T}}=\frac{{I_{\mathrm{bit}}}^2}{2mE_0} \tag{7}$$

式中，m 为由实验得到的单次烧蚀质量数据；E_0 为推力器能量，其表达式如下

$$E_0=\frac{1}{2}CU^2 \tag{8}$$

其中，C 为储能电容器的电容量，U 为工作电压。

2.2 等离子体特性计算模型

2.2.1 电子温度

基于发射光谱理论计算电子温度，首先在等离子体中建立热平衡或局部热平衡假定，并采用不同时刻的发射光谱强度进行计算。粒子间的碰撞使等离子体达到热平衡。根据 LTE 假定，电子的碰撞控制了原子和离子在不同能级上的布局，由波尔兹曼分布关系可知[16]

$$\ln\frac{I_{\mathrm{hn}}\lambda_{\mathrm{hn}}}{g_{\mathrm{h}}A_{\mathrm{hn}}}=\ln\frac{N}{Z}-\frac{E_{\mathrm{h}}}{KT_{\mathrm{e}}} \tag{9}$$

其中，I_{hn} 是相对光强，其由实验测得的谱线电压数据标定而来，A_{hn} 是从高能态 h 到低能态 n 的跃迁几率，λ_{hn} 是波长，g_{h} 是高能态统计权重，N 为粒子数密度，Z 为配分函数，E_{h} 为高能级能量，T_{e} 为电子温度[17]，K 表示波尔兹曼常数。

当选用同一元素进行计算时，两条不同的谱线属于同一电离级次，配分函数 Z 和粒子数密度 N 相同。因此可由同一元素的两条谱线的相对强度之比得到式（10）[18]

$$\frac{I_{\mathrm{hn1}}}{I_{\mathrm{hn2}}}=\frac{A_{\mathrm{hn1}}g_{\mathrm{h1}}\lambda_{\mathrm{hn2}}}{A_{\mathrm{hn2}}g_{\mathrm{h2}}\lambda_{\mathrm{hn1}}}\exp\left(-\frac{E_{\mathrm{h1}}-E_{\mathrm{h2}}}{KT_{\mathrm{e}}}\right) \tag{10}$$

式中，参数下标 1 和 2 表示同一元素的不同谱线。可由式（10）推导出式（11），利用波尔兹曼斜率法拟合成直线，直线斜率即为所求的电子温度[19]

$$\ln\frac{I\lambda}{gA}=-\frac{E}{KT_{\mathrm{e}}}+C_0 \tag{11}$$

式中，I 表示测量的光强，λ 表示所测波长，E 表示所测波长的能级能量，g 表示所测波长的统计权重，A 表示所测波长的电子跃迁几率，C_0 表示常数。

2.2.2 电子数密度

Stark 展宽来自于 Stark 效应一词。Stark 于 1913 年在进行实验的过程中偶然发现了一个现象，静电场的存在会影响到原子发射的光频率。在 PPT 放电通道中，等离子体与大量的带电粒子、电子、离子混合在一起，并不断地运动，因此作用于原子上的电场强度也在不断变化。原子受到该电场的影响，其发出的光频率也存在着一个范围。Stark 展宽即由带电粒子引起的在等离子体中占主导地位的压制展宽。当提到压制展宽时，通常指的就是该谱线的 Stark 展宽。电子数密度的计算要建立谱线 Stark 展宽与电子数密度的函数关系，然后通过实验测量的光谱数据进行计算。而 Stark 展宽影响下的谱线符合洛伦兹线型

$$I(\Delta\lambda)=\frac{W/\pi}{(\Delta\lambda-d)^2+W^2} \tag{12}$$

其中，W 为单边线宽，d 为线移，$\Delta\lambda$ 为到谱线中心的距离。

而多种展宽机制都影响着谱线，主要的影响有 Stark 展宽 $\Delta\lambda_{Stark}$、多普勒展宽 $\Delta\lambda_{Doppler}$、仪器展宽 $\Delta\lambda_{Insturment}$、共振展宽和 van der Waals 展宽等。其中，共振展宽和 van der Waals 展宽太小，可忽略不计。总展宽 $\Delta\lambda_{Total}$ 公式可表示为

$$\Delta\lambda_{Stark}=\Delta\lambda_{Total}-\Delta\lambda_{Doppler}-\Delta\lambda_{Insturment} \tag{13}$$

多普勒展宽和仪器展宽的量级为 10^{-3}nm，如果总的展宽数值较大，可假设由实验所得到的展宽主要受 Stark 展宽影响[20]，因此式（13）可简化为

$$\Delta\lambda_{Stark}\approx\Delta\lambda_{Total} \tag{14}$$

Stark 展宽表示为由带电粒子引起的并在等离子体中占主导地位的压制展宽，它是一个密度函数，存在公式[21]，如下所示

$$\Delta\lambda_s=[(d/w)+2.0\times10^{-4}N_e^{1/4}\alpha(1-0.068N_e^{1/6}T^{-1/2})]10^{-16}wN_e \tag{15}$$

其中，$\Delta\lambda_s$ 为谱线 Stark 线移量，N_e 为电子数密度，T 为电子温度，w 为电子碰撞半宽度，α 为离子展宽参数。

在用此方法计算电子数密度时，要求电子数密度大于 $10^{16}\,cm^{-3}$，并同时满足以下几点

$$10^{-4}\alpha N_e^{1/4}<0.5 \tag{16}$$

$$8.0\times10^{-2}\omega\lambda^{-2}(T/\mu)^{-1/2}N_e^{2/3}>1 \tag{17}$$

$$R=9.0\times10^{-2}N_e^{1/6}T^{-1/2}<0.8 \tag{18}$$

其中，R 表示离子之间的平均距离与德拜半径的比，μ 表示真空磁导率。

将由试验测量得到的 658nm 波长附近的试验数据进行洛伦兹拟合，并求解 Stark 展宽，从而计算得到电子数密度。通过前人研究成果分析，得到电子数密度误差为 3.7%[22]。

3　结果与分析

3.1　试验结果

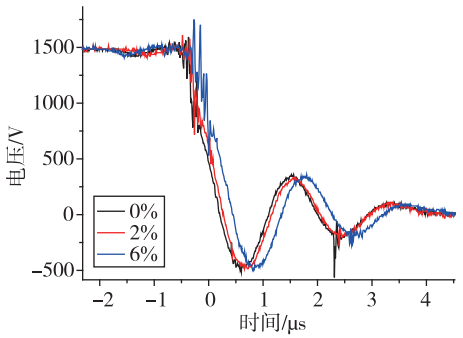
为了测量 PTFE-C、PTFE-Cu 和 PTFE 在 3 种放电能量下的烧蚀质量，PPT 连续点火 500 次，测量工质烧蚀前后的质量。将质量差除以点火次数，得到平均烧蚀质量。每种工质的烧蚀质量如表 2 所示。试验中，PTFE-C-10%在放电能量为 0.81J 时，工质烧蚀表面出现爬电现象；PTFE-C-15%在放电能量为 1J 时，PPT 出现击穿现象，无法正常工作。从试验结果可以得到，随着放电能量的增加，工质烧蚀质量也随之增加。

表 2　烧蚀质量（μg）

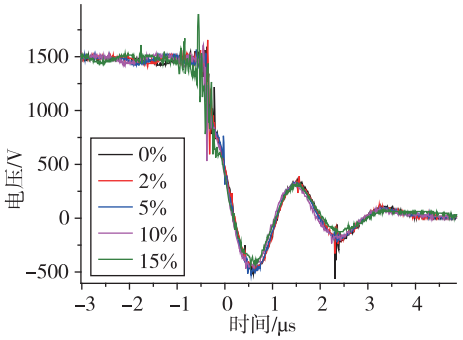
Tab. 2　Ablation mass (μg)

工质/J	1	1.44	2.25
PTFE	3.04	4.86	7.47
PTFE-C-2%	3.30	4.64	6.01
PTFE-C-6%	2.88	3.55	6.95
PTFE-Cu-2%	3.12	4.62	6.26
PTFE-Cu-5%	3.19	5.03	6.91
PTFE-Cu-10%	2.86	5.32	7.69
PTFE-Cu-15%	3.86	4.27	10.68

测量了不同工质在不同放电能量下的放电电压和放电电流。在放电能量为 2.25J 的条件下，比较了不同工质的放电曲线。图 1 为不同工质的放电电压曲线，图 2 为不同工质的放电电流曲线。从图中可以看出，不同工质在相同放电能量下的放电电压和放电电流曲线的变化趋势是相同的，这说明更换工质对 PPT 放电电路的等离子体电阻和电感影响较小。



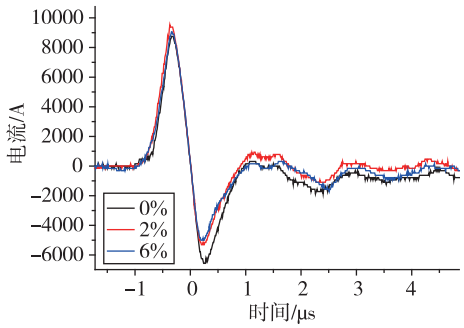
（a）PTFE-C



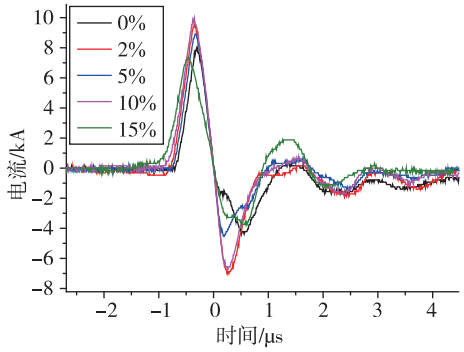
（b）PTFE-Cu

图 1　不同工质放电电压图

Fig. 1　The discharge voltage waveforms with different propellants



(a) PTFE-C



(b) PTFE-Cu

图 2 不同工质放电电流图

Fig. 2 The discharge current waveforms with different propellants

3.2 分析与讨论

在 1500V 放电电压下，PTFE-C 和 PTFE-Cu 的烧蚀质量随含量的增加而增加，烧蚀质量如图 3 所示。PTFE 的熔点为 600K，碳的熔点为 3774K，材料的熔点低，平均烧蚀质量较大，因此 PTFE-C 的平均烧蚀质量低于 PTFE。铜的熔点为 1357K，导热系数为 398 W/（m·k），PTFE 的导热系数为 0.26398 W/（m·k）。材料导热系数高，平均烧蚀质量大。当铜的质量比例小于 9%时，材料的熔点为主要因素，PTFE-Cu 的平均烧蚀质量低于 PTFE；当铜的质量比例大于 9%时，材料的导热系数为主要因素，PTFE-Cu 的平均烧蚀质量高于 PTFE。

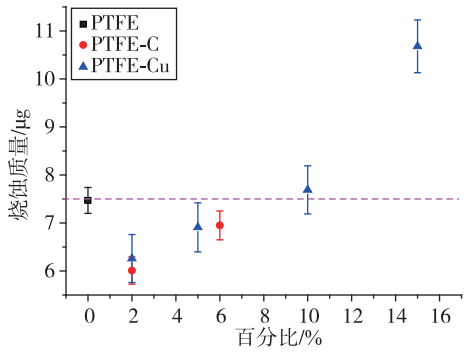


图 3 不同工质的烧蚀质量

Fig. 3 The ablation mass in different propellants

利用性能计算公式，获得不同工质在不同放电电压下，PPT 样机的元冲量、比冲和效率，结果如图 4～图 6 所示。

由图 4～图 6 可知，PTFE-C 的元冲量低于 PTFE 的元冲量，PTFE-Cu 的元冲量在 10%时存在最大值，最大值为 56.47μN·s；大体上而言，比冲随放电能量的增加而增加，PTFE-C-2% 和 PTFE-Cu-10%的比冲最大；在 1500V 放电电压下，PTFE-C-2%和 PTFE-Cu-10%的效率最大。

发射光谱试验测量了氟和碳离子的光谱波长强度，图 7 和图 8 分别为 PTFE-C 和 PTFE-Cu 的 F^+、C^+ 离子光谱波长强度，表 3 为不同工质在 1500V 放电电压下的等离子体温度、密度和工质电离率。

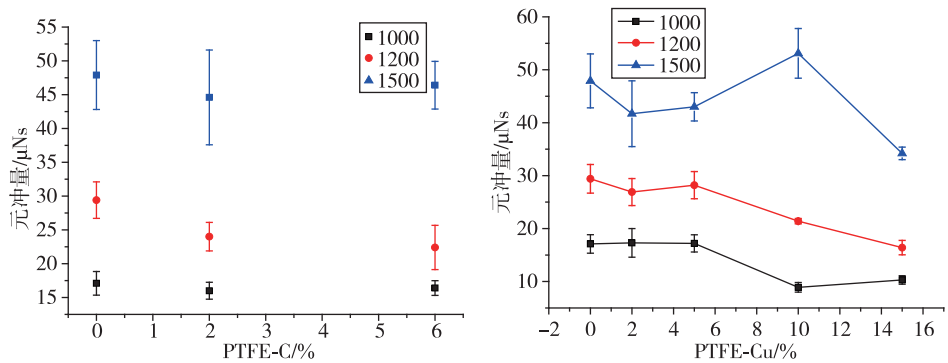


图 4 不同工质的元冲量

Fig. 4 The impulse bit in different propellants

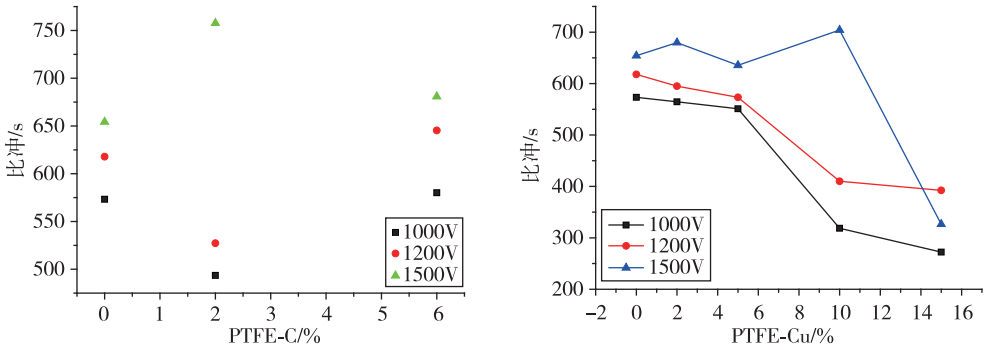


图 5　不同工质的比冲

Fig. 5　The specific impulse in different propellants

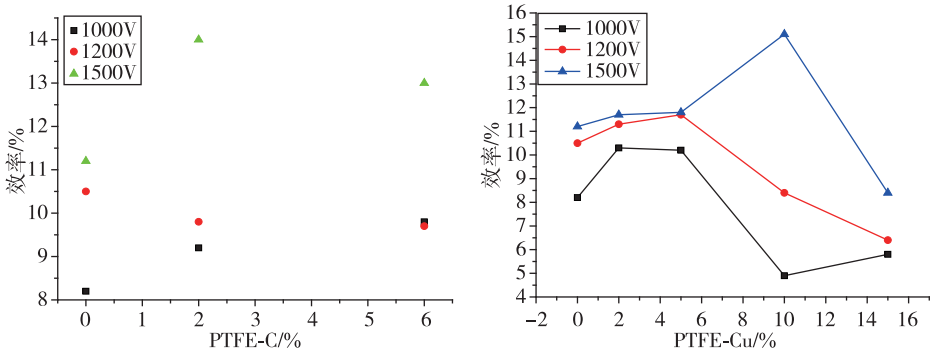
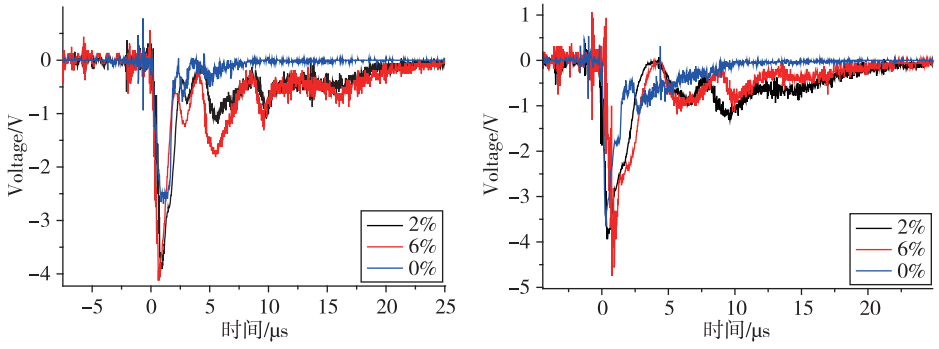


图 6　不同工质的效率

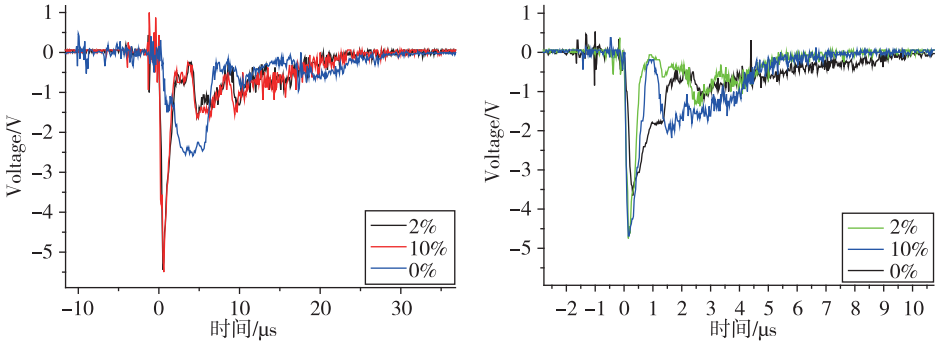
Fig. 6　The efficiency in different propellants



（a）F^+（384.91nm）　　（b）C^+（426.82nm）

图 7　PTFE-C 的光谱强度

Fig. 7　The spectral intensity in PTFE-C



（a）F^+（384.91nm）　　（b）C^+（426.82nm）

图 8　PTFE-Cu 的光谱强度

Fig. 8　Thespectral intensity in PTFE-Cu

表 3 不同工质的等离子体特性参数

Tab. 3 Plasma parameters in different propellants

工质	温度 /eV	密度/cm^{-3}	电离率
PTFE	1.10	1.70×10^{17}	16.03
PTFE-C-2%	0.89	2.00×10^{17}	18.68
PTFE-C-6%	0.92	2.27×10^{17}	16.68
PTFE-Cu-2%	0.87	2.02×10^{17}	16.65
PTFE-Cu-10%	0.89	2.17×10^{17}	17.25

由图 7、图 8 和表 3 可知，PTFE-C 和 PTFE-Cu 的光谱强度高于 PTFE，并且工质电离率也高于 PTFE，这说明 PTFE-C 和 PTFE-Cu 产生的等离子体较多。查询第一电离能表可知，碳的第一电离能为 1086.5kJ/mol，氟的第一电离能为 1681.0kJ/mol，铜的第一电离能为 745.5kJ/mol，PTFE 的第一电离能为 2667.5kJ/mol。当放电能量一定时，碳和铜可以电离更多的电子，促进 PPT 的电离过程。

试验数据及理论估算显示，在 PPT 的放电能量为定值时，等离子体的电子数密度高和工质电离率的提高会提升工质推力器的效率。PTFE-C-2%和 PTFE-Cu-10%的工质推力器效率分别由 11.2%提高到 14%和 15.1%。这一结果表明，在 PTFE 中掺入一定量的铜或碳能促进 PPT 烧蚀电离出更多的离子，提高工质的电离率，从而提高工质推力器的效率。

4 结 论

本研究针对 PPT 效率低下的缺点，对 PPT 的新型固体工质进行了试验分析研究。以不同配比掺杂工质为研究对象，通过试验和数值分析，探究了其在不同放电电压下工作时，工质的性能和等离子体特性参数的变化规律。结论如下：

(1)在 1500V 放电电压下，PTFE-C 和 PTFE-Cu 的烧蚀质量随掺杂含量的增加而增加；PTFE-C 的烧蚀质量低于 PTFE 的烧蚀质量；当含铜量低于 9%时，PTFE-Cu 的烧蚀质量低于 PTFE 的烧蚀质量；当含铜量高于 9%时，PTFE-Cu 的烧蚀质量高于 PTFE 的烧蚀质量。

(2) PTFE-C (2%、6%) 和 PTFE-Cu (10%) 促进了 PPT 的电离过程，有助于提高其工质电离率。

(3)在放电电压为 1500V 时，PTFE-C-2%的 PPT 性能最好，其比冲从 654s (PTFE) 提高到了 758s，效率从 11.2%提高到了 14%；PTFE-Cu-10%的 PPT 性能最好，比冲从 654s (PTFE) 提高到了 704s，效率从 11.2%提高到了 15.1%。

后续工作需要完成工质的长寿命试验，并对目前的试验现象进行数值仿真验证，以及解决工质烧蚀表面的碳化问题。

参考文献 (References)

[1] MEGHNA S. Breakthrough of the Year: The top 10 scientific achievements of 2014 [OL]. (2014-12-18). http://news.sciencemag.org/scientific-community/2014/12/breakthrough-year-top-10-scientific-achievements-2014.

[2] RICHARDSON R G. Elon Musk unveils new plan for global satellite internet [OL]. (2015-01-29). http://news.ecombiz.biz/2015/01/29/elon-musk-unveils-new-plan-for-global-satellite-internet.

[3] 张更新. 现代小卫星及其应用 [M]. 北京：人民邮电出版社，2008.
ZHANG G X. Modern small satellites and applications [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2008 (in Chinese).

[4] 李彬，郑伟，张洪波. 脉冲推力轨道拦截可达性描述及求解方法 [J]. 飞控与探测，2019，2 (4)：26-36.
LI B, ZHENG W, ZHANG H B. Description and solution of orbit interception accessibility with impulse thrust [J]. Flight Control and Detection, 2019, 2 (4): 26-36 (in Chinese).

[5] DAN L, ROGER M, KRISTINA M, et al. The technological and commercial expansion of electric propulsion in the past 24 years [C] //Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference. Atlanta: IEPC, 2017: 10-12.

[6] CIARALLI S, COLETTI M, GABRIEL S B. Results of the qualification test campaign of a Pulsed Plasma Thruster for Cubesat Propulsion (PPTCUP) [J]. Acta Astronautica, 2016, 121: 314-322.

[7] LAU M, HERDRICH G. Pulsed plasma thruster-subsystem engineering at IRS [C] //Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference. Kobe: IEPC, 2015: 2-4.

[8] 王尚民，田立成，张家良，等. 微脉冲等离子体推力器放电过程和性能初探 [J]. 中国空间科学技术，2017，37 (5)：24-32.
WANG S M, TIAN L C, ZHANG J L, et al. Elementary study on the discharge process and performance of micro-pulsed plasma thruster [J]. Chinese Space Science and Technology, 2017, 37 (5): 24-32 (in Chinese).

[9] VONDRA R J. Analysis of solid Teflon pulsed plasma thrust [J]. J. Spacecraft, 1970, 7 (12): 1402-1406.

[10] PALUMBO D, GUMAN W. Continuing development of the short-pulsed ablative space propulsion system [C] // 8th Joint Propulsion Specialist Conference. New Orleans: AIAA, 1972.

[11] LEIWEKE R, TURCHI P, KAMHAWI H, et al. Experiments with multi-material propellants in ablation-fed pulsed plasma thrusters [C] //31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. San Diego: AIAA, 1995.

[12] PENCIL E J, KAMHAWI H. Evaluation of alternate propellant for pulsed plasma thruster [C] //27th International Electric Propulsion Conference. Pasadena, 2001.

[13] SCHÖNHERR T, ABE Y, ARAKAWA Y. Pulsed plasma thruster performance using compound polytetrafluoroethylene [J]. Journal of Propulsion & Power, 2015, 31 (3): 965-967.

[14] 杨乐. 脉冲等离子体推力器工作过程理论和实验研究 [D]. 长沙：国防科学技术大学，2007.
YANG L. Theoretical and experimental study on the working process of pulsed plasma thruster [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007 (in Chinese).

[15] GREGORY G S, MCFALL K A, GUL-CZINSKI F S, et al. Investigation of propellant inefficiencies in a pulsed plasma thruster [C] //Proceedings of 32nd AIAA/ ASME/ SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference. Lake Buena Vista: AIAA, 1996: 5-9.

[16] WANG W, LIU F, WANG X, et al. Study on electron temperature in an ablative pulsed plasma thruster by optical emission spectroscopy [J]. Europhysics Letters, 2013, 101 (5): 55001.

[17] MARTIN W C, WIESE W L, MUSGROVE A, et al. NIST atomic spectra database [J]. Memorie Della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 2005, 8 (1): 96.

[18] 陆同兴，赵献章，崔执凤. 用发射光谱测量激光等离子体的电子温度与电子密度 [J]. 原子与分子物理学报，1994，11 (2)：120-128.
LU T X, ZHAO X Z, CUI Z F. Measurement of electron temperature and electron density of laser plasma by emission spectrum [J]. Journal Atomic and Molecular Physics, 1994, 11 (2): 120-128 (in Chinese).

[19] 冉俊霞，董丽芳，张少朋，等. 仪器展宽对大气压等离子体电子密度测量的影响 [J]. 原子与分子物理学报，2008，25 (3)：651-655.
RAN J X, DONG L F, ZHANG S P, et al. Effect of instrument widening on electron density measurement of atmospheric pressure plasma [J]. Journal Atomic and Molecular Physics, 2008, 25 (3): 651-655 (in Chinese).

[20] LIU F, NIE Z, XU X, et al. Measurement of electron density by Stark broadening in an ablative pulsed plasma thruster [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93 (11): 716.

[21] HUDDLESTONE R H, LEONARD S L, FURTH H P. Plasma diagnostic techniques [M]. New York: Academic Press, 1965.

[22] 左冠宇. 脉冲等离子体推力器等离子体特性计算及性能仿真研究 [D]. 北京：北京理工大学，2016.
ZUO G Y. Study on calculation of plasma characteristic and performance simulation in pulsed plasma thruster [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.