

面向 μ -CAT 的真空沿面电弧放电及烧蚀产物特性

白洁¹, 吴佳玮², 耿金越³, 王亚楠⁴, 王芝¹, 韩若愚¹

(1. 北京理工大学机电动态控制重点实验室, 北京 100081; 2. 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 4. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 针对微阴极电弧推力器(μ -CAT)应用开展了真空沿面电弧放电过程和产物特性研究, 结合放电参数、辐射光谱和高速图像诊断, 研究电脉冲作用下放电等离子体形成和演变过程, 分析不同磁场下等离子体通道和羽流时空演化规律; 收集喷溅产物进行形貌分析, 对比不锈钢和钛电极下放电烧蚀产物的宏、微观特性。结果表明, 放电起始于“电极-真空-涂层”的三结合点, 随后涂层局部放电形成沟通两电极的沿面放电通道; 外施 100 mT 量级的磁场能够改善放电连续性和羽流形貌(发光截面可达无磁场时的 2 倍); 放电结束后, 电极热产物喷射过程可持续 50~60 μ s, 且阴、阳极存在差异。从收集到的喷溅产物来看, 金属电极材料的沉积以均匀分布的纳米颗粒为主, 而电极上方 Si 片沉积呈现微米级无定形石墨形貌。电极烧蚀典型喷溅产物和熔池特征受到电极材料的影响, 不锈钢相对于钛电极的产物粒径及电极烧蚀坑尺径更大。因此, 磁场、电极材质对真空沿面放电过程及产物形貌有一定影响, 从而对 μ -CAT 性能产生影响。

关键词: 脉冲放电; 微阴极电弧推力器; 真空电弧; 图像诊断; 电极烧蚀

Arc Discharge of μ -CAT Oriented Vacuum Surface and Ablation Products Characteristics

BAI Jie¹, WU Jiawei², GENG Jinyue³, WANG Ya'nan⁴, WANG Zhi¹, HAN Ruoyu¹

(1. State Key Laboratory of Mechatronics Engineering and Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Beijing 100031, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper studies the characteristics of vacuum surface arc discharge process and products for micro-cathode arc thruster (μ -CAT). The formation and evolution process of discharge plasma under the action of the electric pulse is studied and the spatial-temporal evolution of plasma channel and plume under different magnetic fields is analyzed by combining with discharge parameters, radiation spectrum and high-speed image diagnosis. The macro and micro characteristics of the discharge ablation products with stainless steel and titanium electrodes are obtained by collecting the splash products for morphology analysis. The results indicate that the discharge initiates from the electrode triple junction (TJ), and then partial discharge of the coating forms a surface discharge channel connecting the two electrodes. Applying a magnetic field of 100 mT magnitude can improve the discharge continuity and plume morphology (the luminous cross-section can reach two times that in the absence of magnetic field). After discharge, the electrode thermal product spray can last for 50~60 μ s, and there are differences between the cathode and anode. From view of the collected splash products, the deposition of metal electrode materials is mainly composed of uniformly distributed nanoparticles, while the Si wafer above the electrode presents the morphology of micron-sized amorphous graphite. The typical characteristics of the splash products and electrode ablation pool are affected by the electrode material. The product particle size and electrode ablation pit size of stainless steel are more affected than those of titanium electrodes. Therefore, the magnetic field and electrode material have a significant impact on the vacuum surface discharge process and product morphology. Consequently, these factors directly affect the performance of μ -CAT.

Key words: pulse discharge; micro-cathode arc thruster; vacuum arc; image diagnosis; electrode ablation

基金资助项目: 国家自然科学基金(12275019; 52007147; 52277134); 中国科协青年人才托举工程(2022QNRC001); 北京控制工程研究所先进空间推进技术实验室和北京市高效能及绿色宇航推进工程技术研究中心开放基金项目(LabASP2020-09)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (12275019, 52007147, 52277134), Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2022QNRC001), Advanced Space Propulsion Laboratory of BICE and Beijing Engineering Research Center of Efficient and Green Aerospace Propulsion Technology (LabASP2020-09).

0 引言

真空电弧放电作为一种等离子体源,是产生离子束流重要方式,广泛应用于离子注入^[1]、薄膜沉积硬质涂层^[2]、透明导电氧化物薄膜沉积^[3]等应用。近年来,真空电弧在航天电推力器方面的应用亦受到研究人员关注,其原理是利用电/磁场对离子进行加速,从而获得相应的冲量(推力)^[4]。Keidar 等人研制出微阴极真空电弧推力器(micro-cathode arc thruster, μ -CAT),并首次将微阴极电弧放电装置应用到空间推进领域^[5-6]。 μ -CAT 是一种利用真空条件下脉冲电弧放电烧蚀阴极材料、形成高密度及高电离度的等离子体,在外加磁场梯度作用下等离子体迅速扩张产生推力的新型微推力器,具有总冲高、体积小、安全性高等特点,具有广阔的发展和应用前景。

真空下电极间隙击穿(点火)过程主要依赖于阴极表面电子发射过程^[7],不存在电子雪崩效应^[8]。因此,纯真空间隙击穿往往十分困难,且具有较大分散性。若想实现重频稳定工作的真空脉冲电弧放电,而又不增加推力器的附加重量,可以在电极间的绝缘体表面镀一层导电薄膜,实现“无触发”点火^[9]。但是这种方法会对导电薄膜产生一定损耗,成为制约推力器寿命的短板。换言之,导电薄膜既是诱导产生真空沿面放电的原因,也为等离子体烧蚀提供了除电极外额外来源,增强了等离子体羽流、有效增加了比冲,是决定推力器性能的关键环节。王雯倩等人对电极间涂有钛导电薄膜的同轴型 μ -CAT 开展了全寿命放电试验,发现降低放电频率,增加导电薄膜厚度,可以提升 μ -CAT 寿命^[10]。耿金越等人对“无触发”起弧点火的研究发现,发现相对于低电流(10 A)放电,较大放电电流(40 A)条件下可以使“无触发”推力器寿命更长^[11]。

μ -CAT 外加磁场的设计可以提升等离子体喷射速度、改善阴极材料烧蚀均匀度,因此研究磁场下电弧等离子体行为是有必要的。Beilis 对真空电弧点在叠加磁场中的行为给出了理论解释,提出了真空电弧阴极点在斜截阴极表面的磁场中的运动模型^[12]。关于真空电弧等离子体加速机理目前存在电势峰加速理论、气动加速理论及电磁加速理论,其中气动加速占主导地位。黄文栋等人通过对电弧等离子体射流加速机制的研究发现,尽管自感电磁场对等离子体羽流的速度影响不大,但外加磁场可以

影响阴极斑点运动,进而影响等离子体羽流运动^[13]。传统的脉冲等离子体推力器(pulsed plasma thruster, PPT)中推进剂被电离后,通过电磁加速产生推力,未外加磁场,其放电在方位角和径向上会产生不均匀性^[5]。对真空电弧推力器(vacuum arc thruster, VAT)的研究发现,使用轴向磁场可以较大改善推力器性能^[14-15]。研究表明,外加磁场在 μ -CAT 中可以约束等离子体羽流、提高等离子体速度。外加磁场为 300 mT 时,等离子体羽流中离子平均速度可达 3.5×10^4 m/s,比在无磁场时提高了 2~3 倍^[16]。同时,外加磁场能有效减小等离子体羽流发散角^[17],避免返流对推力器造成污染。Zhuang 等人实现了对 μ -CAT 的矢量控制,用于调节等离子体羽流方向和推力偏转角度^[18]。Brieda、耿金越等人对 μ -CAT 的数值仿真研究结果也表明外加磁场可以使等离子体沿磁场通道加速定向喷出^[19-20]。此外,不同电极材料下放电等离子体特性也不同。Yushkov 等人对元素周期表中大多数导电元素进行了离子速度测量,发现相同条件下, Mg 阴极下离子速度最大, In 阴极下离子速度最小^[21]。王帅等人发现相较于 CuW 合金和 AgW 合金, Ti 阴极材料下电子数密度最低,而电子温度最高^[22]。因此,合适的磁场和电极材料直接影响着推力器性能和寿命。

虽然国内外研究人员对真空电弧点火机制及磁场下电弧等离子体动力学行为开展了大量研究,然而 μ -CAT 的瞬态沿面放电起始与发展过程的物理图像以及等离子体时空演变的研究仍有欠缺,不能为 μ -CAT 性能进一步优化,寿命进一步提高提供支撑;另一方面,当前等离子体羽流以观测为主,对其形貌、组分等微观特征认知不足,制约了对烧蚀过程和推力产生机制的理解。基于此,本文采用共面平行对置电极结构,开展微秒尺度下“无触发”沿面电弧放电动态过程物理图像及等离子体羽流在不同磁场下行为的研究,并选取不锈钢(SS304)和 Ti 电极进行对比研究,得到空间不同位置的羽流产物分布与电极烧蚀情况。通过研究对磁场-羽流形貌-喷溅产物分布之间的关联有了更清晰的认识,有望为提升 μ -CAT 性能与设计优化提供支撑。

1 实验装置

实验所用的真空电弧放电系统如图 1 所示。图 1(a)为实验电路原理图,电源采用全固态脉冲高压电源,脉宽 0~1 ms 可调,脉冲上升/下降沿 50~500

ns 可调, 脉冲电压 0~15 kV 可调, 输出频率 0~15 kHz 可调。 R_x 为回路限流电阻。当到达预设电压附近时, 空气开关击穿导通, 脉冲电流通过真空舱上端电路接口传至舱内放电电极。图 1(b)为放电装置结构示意图, 放电装置放置在真空舱内, 真空舱气压可至 10^{-4} Pa。

放电负载如图 1(b)附图所示, 放电电极平行放置在氧化铝陶瓷基板上(大小 50 mm×100 mm×3 mm), 在其间喷有碳导电涂层(初始电阻百欧姆级), 以实现“无触发”放电。电极采用 10 mm×15 mm×4 mm 的金属块体(表面抛光), 选用面积为 15 mm×4 mm 的面进行放电, 电极放电间距为 4 mm。磁场采用永磁体钕铁硼产生, 磁场方向与等离子体喷溅方向一致。

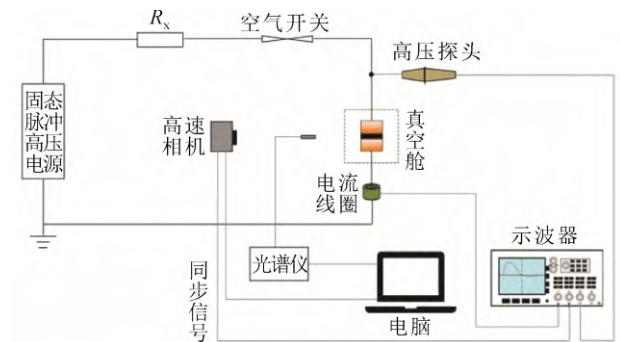
电压信号通过高压探头 P6015A(75 MHz)采集, 电流信号通过电流线圈 Pearson4100(25 MHz)或 Pearson5046 (20 MHz)采集。示波器为 DPO4104B (1 GHz)。放电发展过程等离子体自辐射行为通过高速相机(Phantom VEO710)记录, 相机最高帧率 680 000 帧/s, 最短曝光时间 1 μ s, 为保证拍摄效果, 实验中采用帧率为 200 000 帧/s。放电发射光谱通过时间积分光纤光谱仪(Ocean USB2000+)采集, 波长范围(180~900 nm), 采集光纤对准放电区域并固定在真空舱玻璃壁外部。

2 结果与讨论

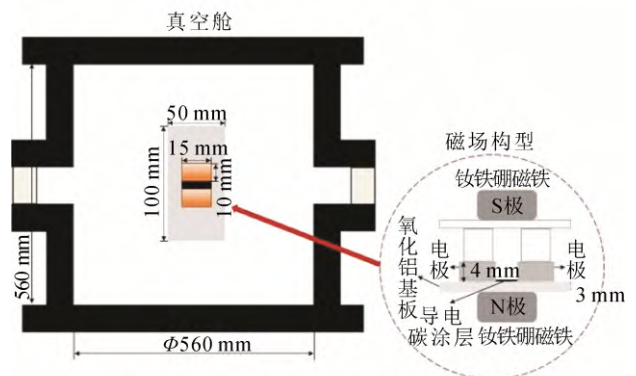
真空沿面脉冲电弧一般放电图像如图 2 所示, 可以明显看到等离子体喷溅羽流, 并伴随有电极溅射现象。但由于真空脉冲电弧放电为瞬态过程, 需要通过高速摄影捕捉放电过程的高帧率分辨图像, 从而获取放电过程中等离子体关键参数的时空演变过程。由于磁场是提高 μ -CAT 推力产生效率的关键因素, 需要对比不同磁场下放电特性与规律。另外, 从图中可以看出, 等离子体羽流分别向上、两侧电极溅射, 因此发掘脉冲电弧过程与沉积产物的时空对应性, 明确典型材质的烧蚀特征是有必要的。本文针对上述内容展开研究, 结果如下文所示。

2.1 典型放电图像及等离子体时空演变过程

图 3 为 Cu 电极材料, 电极间距 4 mm, 放电预设电压 10 kV(实际击穿电压约为 5.9 kV), 放电脉宽 100 μ s, 回路限流电阻 R_x 为 300 Ω 条件下, 电极间外加磁场 100 mT 时的典型真空沿面电弧放电过程。其中磁场采用特斯拉计进行测量。高速相机拍摄时



(a) 实验电路原理图



(b) 放电装置结构俯视图和磁场构型侧视图

图 1 实验平台原理图

Fig.1 Schematic diagram of experimental platform

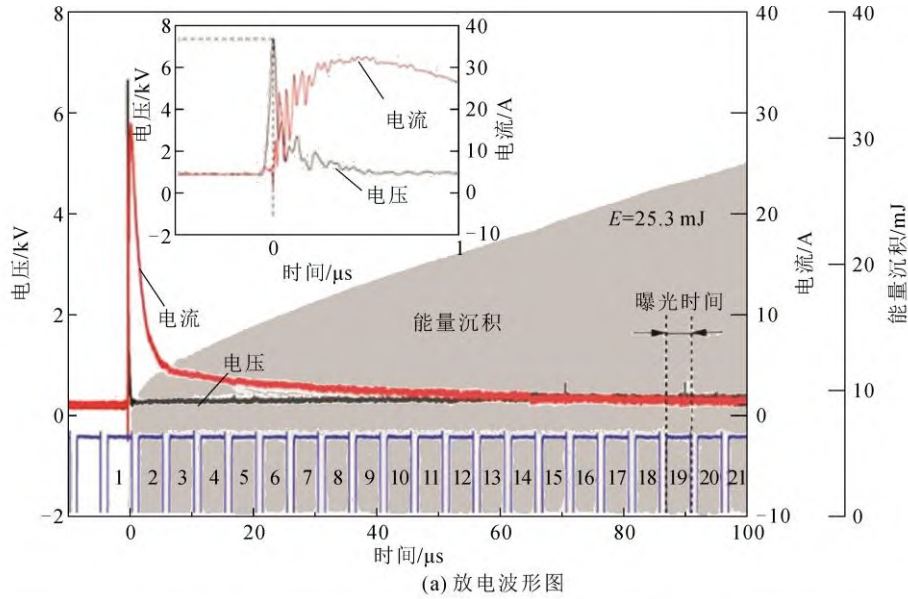


图 2 CCD 相机拍摄真空电弧放电主要过程图片

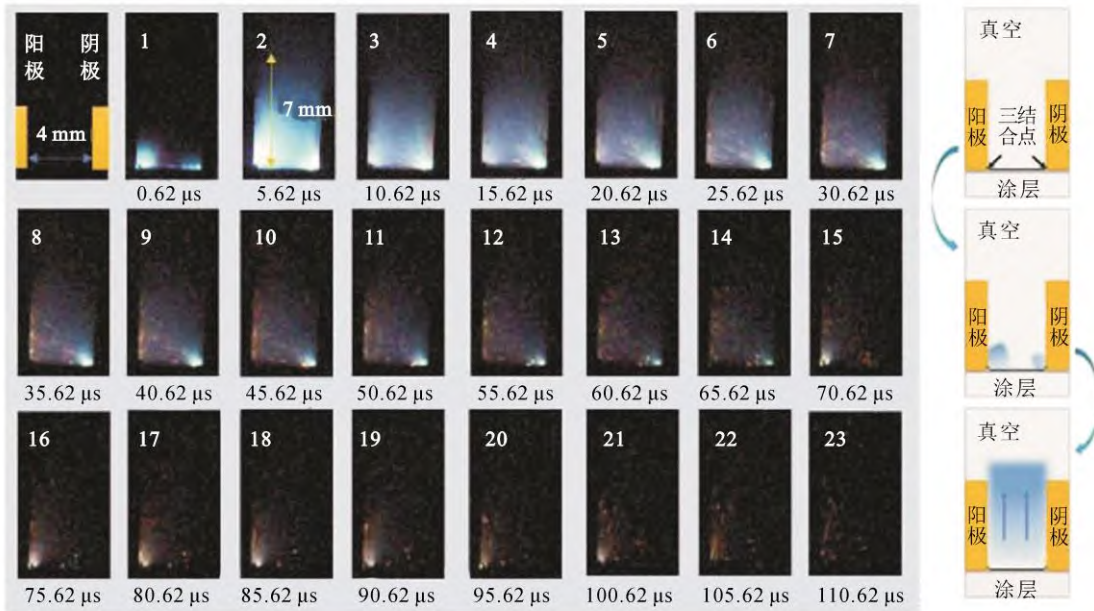
Fig.2 General process picture of vacuum arc discharge taken by CCD camera

间间隔为 5 μ s, 单帧曝光时间为 3.88 μ s。图 3(a)中下方方波代表高速相机的门宽和步长, 图 3(b)中图像左上角的数字代表图片拍摄序号, 图像下方为对应图片曝光结束时刻。

从放电波形图中可以看出, 放电过程可以分为 3 个阶段, 一是击穿(点火)阶段, 在放电开始后的 15.6 ns, 由于杂散电容存在, 阳极(高压端电极)侧的电压分布更高、场强更强, 放电起始阶段阳极附近的放电强度更高; 同时, 强电场的存在使电极间形成局域电子发射(Nottingham 加热), 促使涂层沿面放电过程的发展, 形成贯通两电极间的等离子体通道^[23], 早期 Joule 加热机制可见文献[24]对真空电



(a) 放电波形图



(b) 等离子体羽流高速摄影图像和放电前期动态示意图

图3 100 mT 磁场下典型真空电弧放电过程

Fig.3 Typical vacuum arc discharge process under 100 mT magnetic field

弧触发参数的定量估算。二是燃弧阶段，等离子体通道形成后，电极间电阻快速下降、电流上升，等离子体急剧增强，但电源储能有限，电流达峰后逐渐下降，等离子体辐射强度随之衰减。三是烧蚀产物喷溅阶段，随着放电电流的不断衰减，系统的能量沉积不足以弥补等离子体辐射和扩散造成的能量损失，等离子体辐射集中在阴极和阳极与导电涂层的交界处(羽流辐射甚微)，且存在宏观微米级尺度高温产物的喷溅。

图 3(b)为上述放电全过程对应的等离子体高速摄影图像和放电前期的动态过程示意图。第 1 帧抓

取了放电初始 0~0.62 μs 内的等离子体辐射过程，可以发现载流导电涂层上存在不规则亮斑(局部放电等离子体)^[25]，这可能是由于涂层微观的不均匀性，能量沉积不均匀导致局部过热发生微小“电爆炸”，类似电-热不稳定性机制^[26]。两电极下侧场强集中的“三结合点”(电极-真空-涂层)^[27-29]处放电最为剧烈，且阳极强度高于阴极，可以推断电流加载后导电涂层很快产生了蒸气^[30]，在三结合点处首先发生电离。在一定时间后，沿面等离子通道形成，连通两电极，进入燃弧阶段，与此同时，等离子体在扩散作用(密度梯度、热梯度)下向上扩散喷射，在

第 2 帧即放电 1.74~5.62 μs 内, 放电最为剧烈, 此时对应图 2(a)中电流较高值, 说明电流越大, 金属蒸气越多, 蒸气电离度越高。第 3—14 帧可以看到, 阴极产生明显的喷溅现象, 理论上是因为, 此时阴极部分有着明显的阴极斑点, 阴极斑点处, 电流密度极高, 对阴极烧蚀更为严重。电极烧蚀产物喷溅过程和局部电流集中(斑点)导致的熔池形成过程密不可分, 一方面加热形成熔池需要时间, 另一方面电流脉冲导致的电磁力变化导致了熔池中金属液体不稳定性发展^[31-32], 与气体电弧烧蚀有类似之处, 这使得喷溅过程滞后于等离子体通道形成过程数微秒。

在放电开始一段时间后, 电源中电容器存储能量不足以维持燃弧过程, 放电逐渐减弱, 等离子体

密度和温度降低, 阴极等离子体斑点和喷溅过程也随之减弱。值得注意的是, 第 15—22 帧发生了阳极喷溅现象, 高速图像给出了阳极烧蚀喷溅的直观过程。前期阴极烧蚀喷溅与后期阳极喷溅烧蚀有着明显的不同, 阴极烧蚀喷溅为斜向上方向, 而阳极烧蚀喷溅为偏竖直向上, 推测可能与阴极阳极电流分布和斑点特性有关。阳极喷溅一定时间后逐步减弱, 23 号图电弧熄弧。

2.2 放电等离子体在不同磁场下的行为

为研究等离子体羽流在不同磁场下的发展过程, 进行了磁场为单一变量条件下放电过程研究。无磁场和 150 mT 磁场的放电条件与上述 100 mT 磁场时一致。无磁场和 150 mT 磁场下典型放电特性结果如图 4、图 5 所示。从表 1 中可以看出, 随着

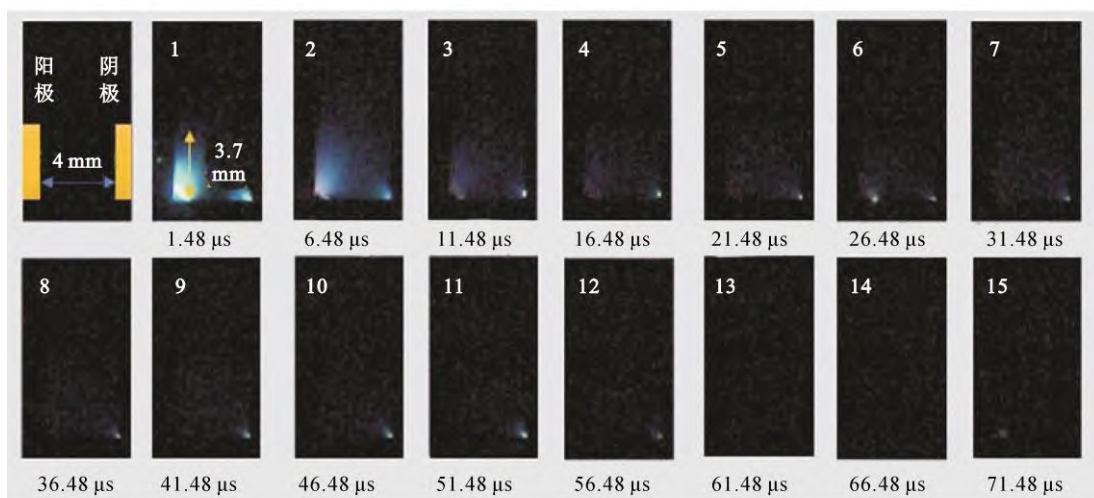
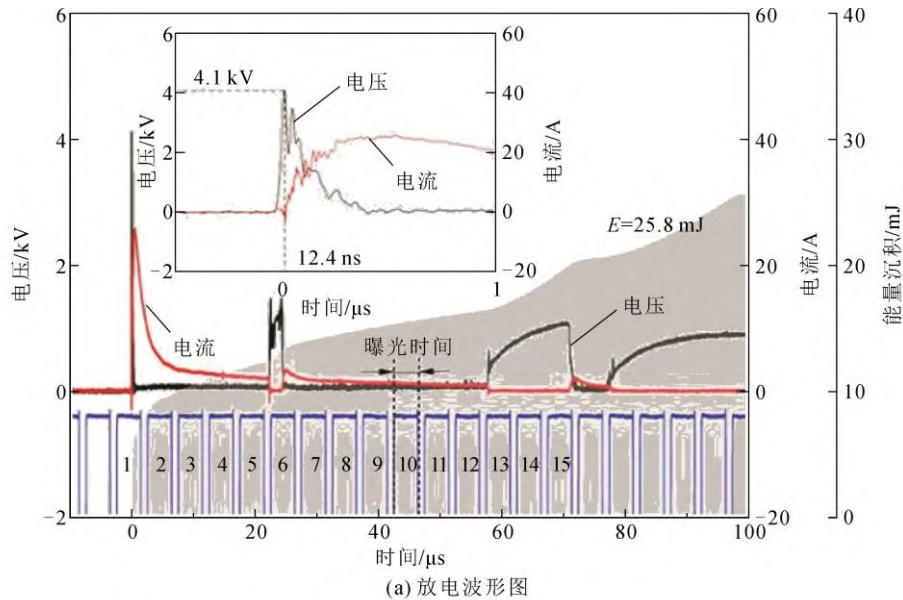
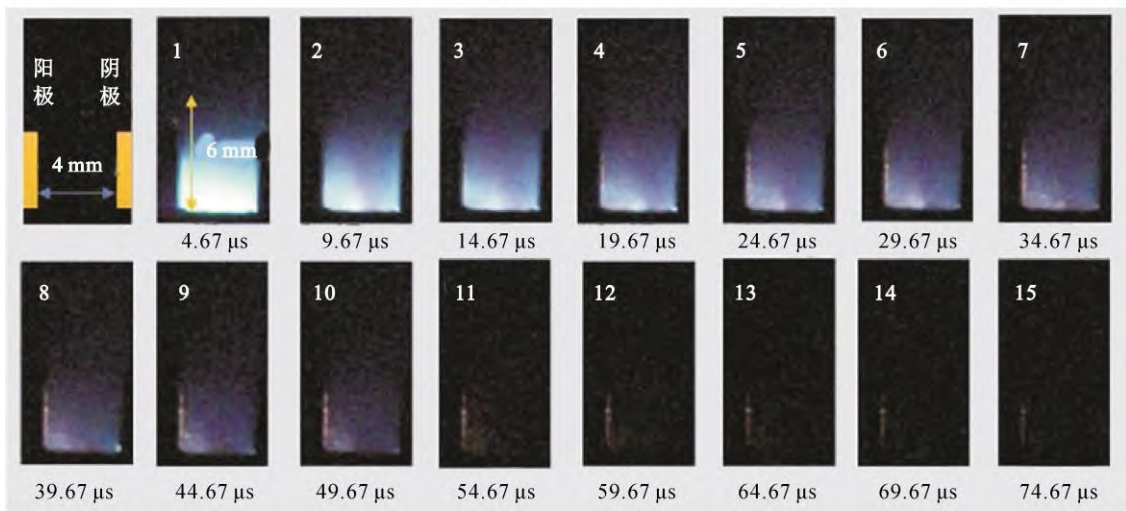
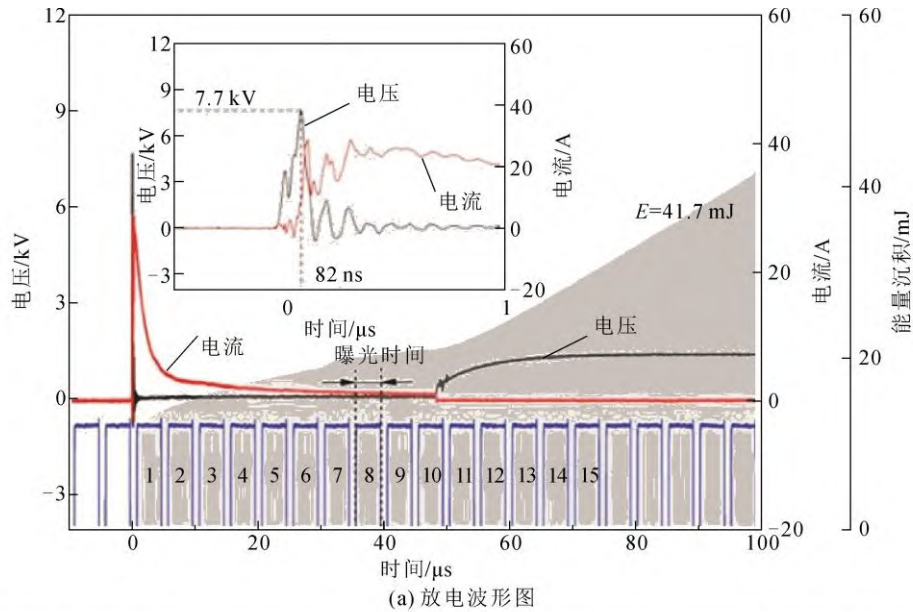


图 4 无磁场时典型真空电弧放电过程

Fig.4 Typical vacuum arc discharge process without magnetic field



(b) 等离子体羽流高速摄影图像

图5 150 mT 磁场下典型真空电弧放电过程

Fig.5 Typical vacuum arc discharge process under 150 mT magnetic field

表1 不同磁场强度下放电特性比较(典型值)

Table 1 Comparison of discharge characteristics under different magnetic field intensities (typical value)

磁场强度/mT	击穿时刻/ns	击穿电压/kV	回路峰值电流/kA	能量沉积/mJ	等离子体羽流最大长度/mm
0	12.4	4.1	25.4	25.8	3.7
100	15.6	5.9	25.5	25.3	7.0
150	82	7.7	28.8	41.7	6.0

磁场的增加, 其击穿时刻、击穿电压、回路峰值电流和等离子体羽流长度均呈增大趋势, 这表明磁场对沿面放电有较大影响。当不加磁场时, 电极间放电十分不稳定, 会出现多次放电间断问题, 理论上是因为在没有磁场时, 放电集中在导电薄膜附近,

且产生的等离子体通道无规则扩散, 导致电极间隙等离子体密度较低, 因此随着回路电流下降, 残余等离子体难以维持稳定放电。

图4(b)和图5(b)分别为不加磁场和磁场 150 mT 下的等离子体羽流高速摄影图像。从图中可以明显看出, 电路添加磁场时更有利于等离子体羽流的发展。不加磁场时, 电极间放电强度较弱, 且分布不均匀。有外加磁场时, 放电最初发生在阴阳两极, 在局部集中的电场(远大于平均电场, 约 MV/m 级)作用下, 电极、真空和涂层接触的“三结合点”成为电子发射的来源, 电极间逐渐建立放电通道。在击穿发生后, 由于导电通道的存在, 间隙间电场变弱, 电流增加, 等离子体密度增加, 外加磁场的效能

开始显现, 由导电碳涂层引导的放电产生的等离子体羽流会迅速向间隙中间位置聚集, 电极之间充满金属蒸气, 即放电介质, 随后阴极金属蒸气补充导电薄膜, 更加利于放电的发展, 放电持续性增强。随着与导电薄膜间距离的增大, 等离子体密度逐渐减小。外加磁场后离子增多的主要原因是磁场垂直于放电沿面的平面, 放电产生的电子沿磁场线螺旋进动, 增加了相同空间内电子与中性气体的碰撞概率(磁约束)。因此, 磁场可以改变放电均匀性和等离子体羽流行为, 这对推力产生至关重要。

对比图 3(b)、图 5(b)中不同磁场下的羽流形貌及图 6 中等离子体辐射相对强度可以看出, 相比于 150 mT 磁场下, 磁场强度为 100 mT 时等离子体羽流持续时间更长, 羽流长度更大, 但等离子体密度更低, 说明磁场越高越有利于产生密度更高的等离子体。实验中磁场垂直于放电沿面的平面, 然后产生的电子会沿着磁场线螺旋进动, 增加了相同空间内电子与中性气体的碰撞概率(磁约束), 这可能是磁场强度提升后, 离子增多的主要原因。但密度较高的等离子体由于本身电中性的维持, 反而不利于羽流的对外发展, 因此在相对小一些的磁场下, 反而会产生更加明显的喷射现象。因此, 在选择磁场时需要根据电极结构以及电源设置选择合适的磁场, 使等离子体以最大程度喷出, 减小等离子体回流造成的污染, 从而在一定程度上增大推力器的寿命。

一般而言, μ -CAT 中推力的来源可能为两个方面, 一方面是传统意义上向外膨胀扩散的等离子体羽流, 上文表明磁场对羽流行为有较大影响; 另一方面则是上文放电自辐射图像中展示的阴/阳极喷

溅现象, “电极-真空-涂层三结合点”的结构设计是影响喷溅行为的主要因素。因此在探究推力产生机制与空间分布时, 两方面的推力来源皆需要考虑。为进一步分析上述两方面推力来源, 下文主要探究羽流喷溅产物及电极烧蚀产物沉积特性, 从产物宏观形貌、组分/价态等方面展开具体研究。

2.3 不同电极材料羽流沉积与电极烧蚀沉积特性

由于真空条件下, 粒子(电子)自由程极大, 因此最初放电电子发射过程主要取决于电极本身的物理和结构特性。电极良好的导电性可易于放电电弧的产生; 耐热性高可降低由于电流 Joule 热而造成的阳极热损耗。Polk 等人总结了不同材料激发电弧特性^[33], 对比表中不同材料的相关参数, 综合价格、熔点、导电性、耐热性等因素, 实验采用 Cu、SS304 与 Ti 作为电极进行实验。上文已表明 Cu 电极材料下不同磁场对等离子体羽流特性存在影响, 下面讨论 SS304 与 Ti 电极材料下等离子体羽流及电极烧蚀沉积特性。表 2 中对两种电极材料的沉积产物形貌进行了归纳。

2.3.1 不同电极材料下放电电光学和羽流特性

图 7、图 8 为相同条件下 SS304 和 Ti 电极材料的典型放电波形图及对应的高速摄影图像。分析两种电极材料下典型自辐射光谱^[34-35], 180~900 nm 波长范围内典型电弧光谱图如图 9 所示。两光谱图除电极材料不同以外, 其余条件相同, 包括光谱位置, 采集时长。

从图 7(a)、图 8(a)中可以明显看出, 相比于 Ti 电极, 使用 SS304 做电极时, 放电过程中沉积能量更多, 表明 SS304 电极放电更为剧烈, 产生的粒子速度更快。从图 7(b)、图 8(b)中可以看出在放电后

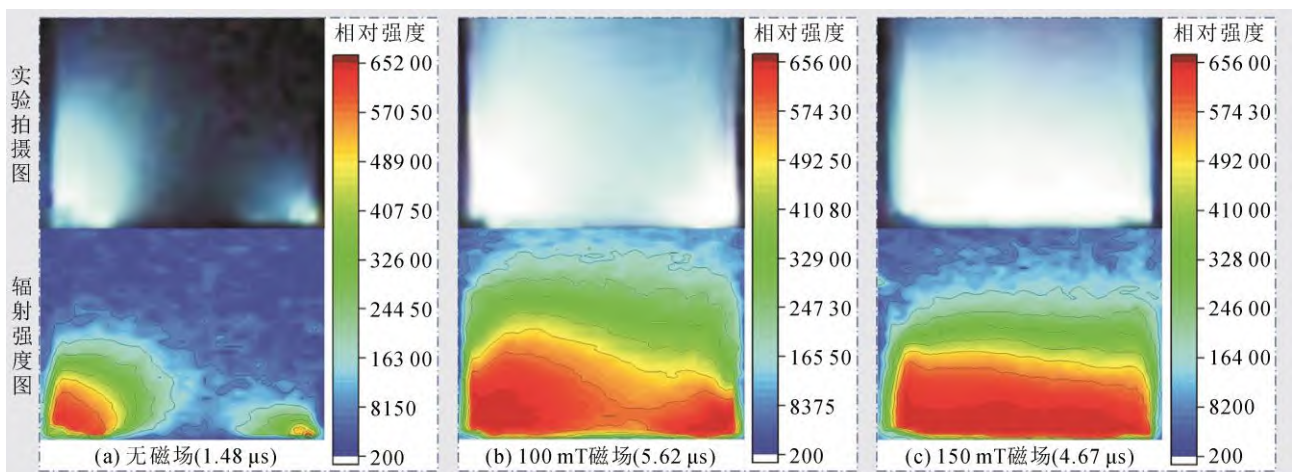


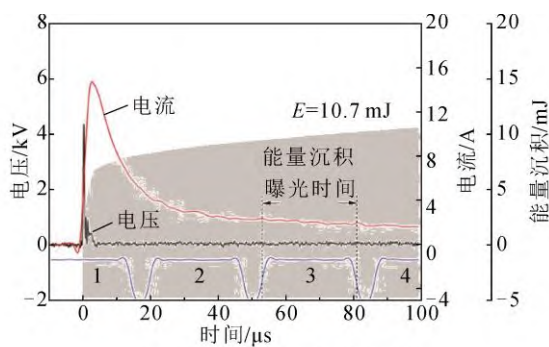
图 6 3 种磁场情况下等离子体辐射相对强度

Fig.6 Plasma relative radiant intensity under three magnetic fields

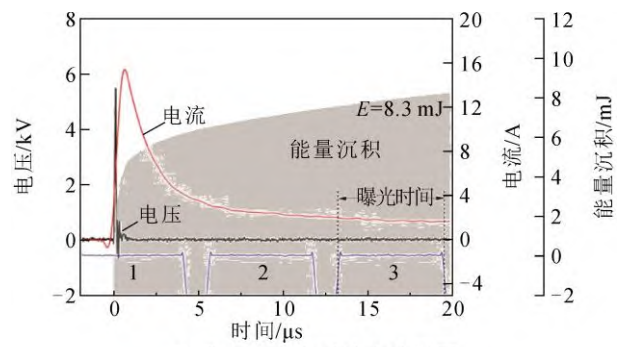
表 2 沉积产物表征结果(典型情况)

Table 2 Characterization results of deposition products (typical)

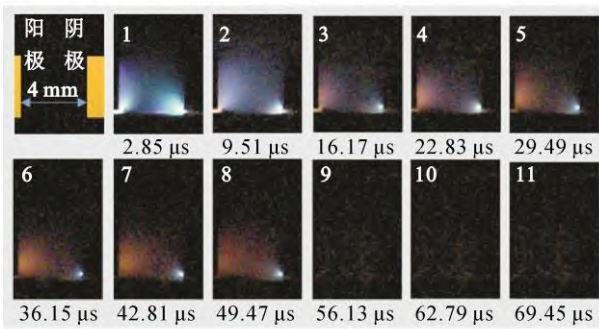
对比内容	SS304 电极	Ti 电极
电极上	更厚、更明显	更浅
方 Si 片	分布更密集、尺径更大	分布更稀疏、尺径更小
沉积产物	较大产物粒子为碳、极小尺径产物为 SS304	较大产物粒子为碳、极小尺径产物为 Ti
元素组成	蒸气沉积	蒸气沉积
阴极烧蚀与表面沉积产物	烧蚀沉积形貌明显、挨近导电涂层区域呈亮白色	烧蚀沉积形貌明显、挨近导电涂层区域呈亮白色
微观形貌	烧蚀坑尺径更大、有明显纳米颗粒状产物分布	烧蚀坑尺径更小
元素组成	主要为来自导电涂层的碳	主要为来自导电涂层的碳
阳极烧蚀与表面沉积产物	有明显沉积镀层、无亮白色区域	有明显沉积镀层、无亮白色区域
微观形貌	沉积产物尺径更大、有纳米颗粒状附着物	沉积产物尺径更小
元素组成	主要为来自导电涂层的碳	主要为来自导电涂层的碳



(a) 典型真空电弧放电波形图



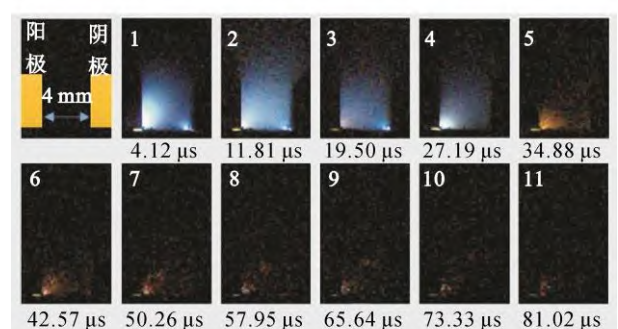
(a) 典型真空电弧放电波形图



(b) 典型等离子体羽流高速摄影图像

图 7 SS304 电极材料下放电过程(高速相机拍摄间隔为 6.66 μs, 单帧曝光时间 5.54 μs)

Fig.7 Discharge process under SS304 electrode material(High-speed camera shooting interval is 6.66 μs, single frame exposure time is 5.54 μs)



(b) 典型等离子体羽流高速摄影图像

图 8 Ti 电极材料下放电过程(高速相机拍摄间隔为 7.69 μs, 单帧曝光时间 6.31 μs)

Fig.8 Discharge process under Ti electrode material (high-speed camera shooting interval is 7.69 μs, single frame exposure time is 6.31 μs)

期, SS304 电极下主要为阴极喷溅, 而 Ti 电极下主要为阳极喷溅。虽然 SS304 电极下的羽流亮度及强度弱于 Ti 电极, 但放电持续时间更长。

对比图 9(a)、图 9(b)可以看出, 不同电极材料的辐射光谱图有相似特征谱线。由于低气压环境及电极表面携带的微气体均含有空气, 采用不同电极

材料时, 电弧等离子体团中含有 N 元素。导电涂层的激发导致等离子体团中含有大量 C 元素, 并且从 $C_{I, 659}$ 谱线可以看出, SS304 为电极时等离子体中 C 的含量高于 Ti 为电极时 C 的含量, 这是因为 SS304 中含有大量的 C, 在阴极烧蚀过程中会形成蒸气介质, 从而最终形成等离子体。其余特征谱线是有区别的, 理论上金属蒸气的物质主要来自于电极材料, 因此对照不同物质原子跃迁谱线表, 可以标出如图 9 所示谱线分布。

结合图 7(b)、图 8(b)高速相机拍摄的 SS304 和 Ti 电极时空分辨自辐射图像和图 9 积分辐射光谱图可以看出, 两种电极材料下在放电早期辐射光均为短波长的蓝白光, 一方面是较高密度的等离子体连续谱, 另一方面是金属等离子体, 表明存在强烈的等离子体-电极相互作用过程; 而放电后期则均呈现暗红色光谱, 其主要对应 500 nm 之后 N、C 的几个原子谱线, 这表明此过程中导电涂层蒸发材料对光谱有更多贡献^[36]。

2.3.2 不同电极材料下羽流沉积特性

采用导电 Si 片收集电极间隙喷溅产物, 收集方法示意图和宏观喷溅形貌如图 10 所示。通过 SEM、

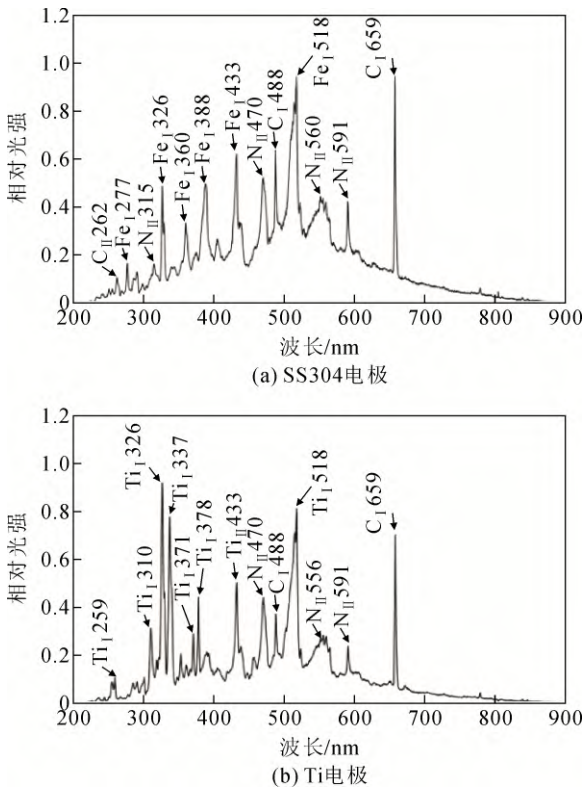


图 9 不同电极材料下典型辐射光谱图
Fig.9 Typical radiation spectra under different electrode materials

EDS 表征方法探测喷溅产物的微观形貌及成分, 结果如图 11、图 12 所示。

由图 10 中的宏观喷溅形貌可以明显观测到, SS304 电极下可以产生更厚、烧蚀更加明显的喷溅产物层, 这可能与 SS304 电极下放电持续时间更长正相关。从图 11(a)、图 11(b)中微观形貌中可以看出, 喷溅产物呈微米级无定形石墨形貌, SS304 相对于 Ti 电极会产生更加密集且有堆积成块的喷溅

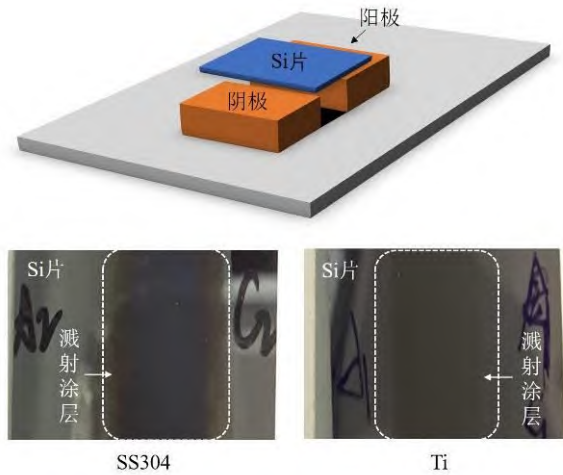


图 10 电极间隙喷溅产物收集方法示意图和宏观喷溅形貌
Fig.10 Schematic diagram of collection method for splash products between electrodes and macro splash morphology

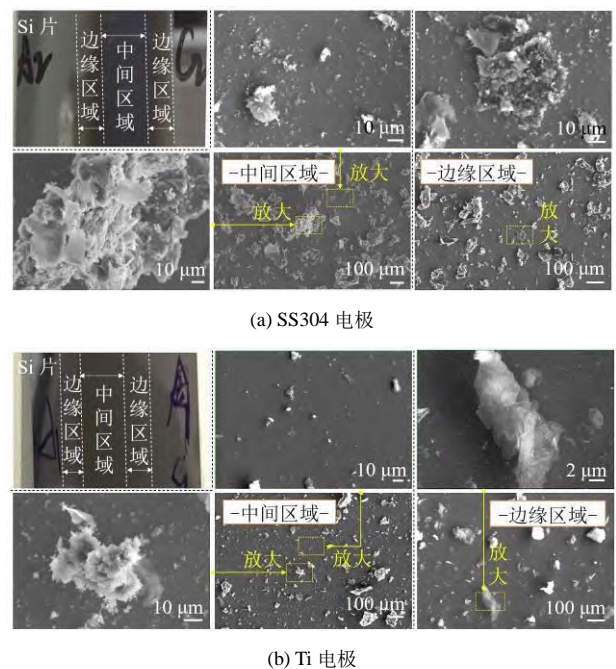
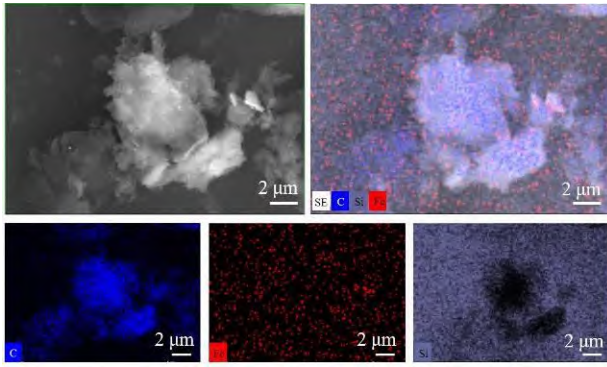
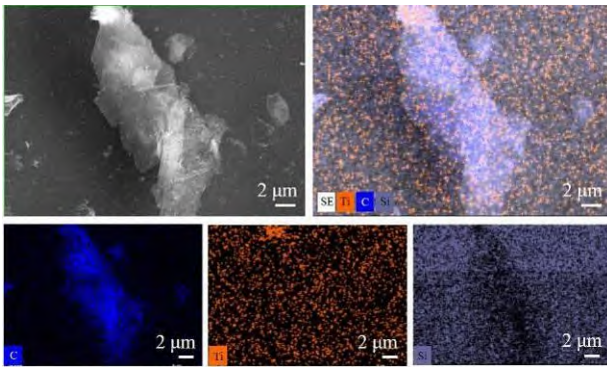


图 11 电极间隙喷溅产物在不同空间尺径下的微观形貌
Fig.11 Micro morphology of the products splatted from electrode under different spatial scales



(a) SS304 电极



(b) Ti 电极

图 12 电极间隙喷溅粒子微观形貌和成分分析

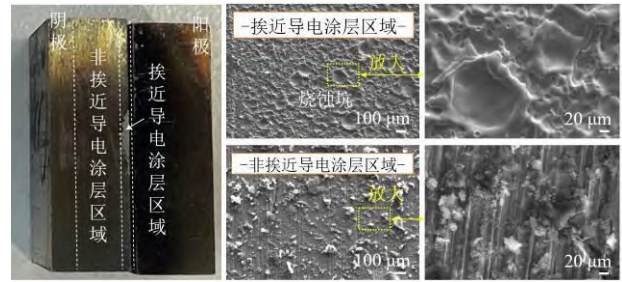
Fig.12 Micromorphology and elementary analysis of splash particles in electrode gap

产物，喷溅产物尺径更大，分布更加密集。两种电极材料都可以看出中间喷溅产物数量更多一些。这种分布可能是由于喷溅等离子体本身运动产生电流从而感应磁场^[37]，在其自身磁场自箍缩作用下形成的。且由宏观、SEM 图像可以看出 SS304 电极下等离子体的自箍缩效应更明显，这是因为其喷溅粒子数量更多，感应磁场更强。由图 12(a)、图 12(b)可以看出，电极间隙喷溅产物粒子成分主要为碳，而金属电极在喷溅过程中形成金属蒸气，其尺寸十分微小，可以忽略。

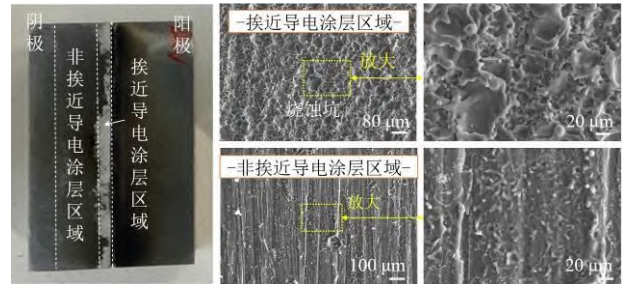
综上可以得出，相对于 Ti 电极，SS304 电极间隙喷溅产物层更厚，且喷溅产物尺径更大，对导电碳涂层损耗更严重。可以推断出，放电越剧烈会导致中间导电碳涂层烧损更重，而放电不剧烈时会对导电涂层有着较轻的损耗。所以合适的电极与导电材料对推力器寿命影响十分巨大，应予以优化考虑。

2.3.3 不同电极材料下电极烧蚀与沉积特性

图 13 为两种电极材料阴极烧蚀沉积物的宏观形貌及不同空间尺径下的微观形貌。从宏观形貌中可以看出两种材料有着明显的烧蚀沉积形貌，阴极



(a) SS304 阴极



(b) Ti 阴极

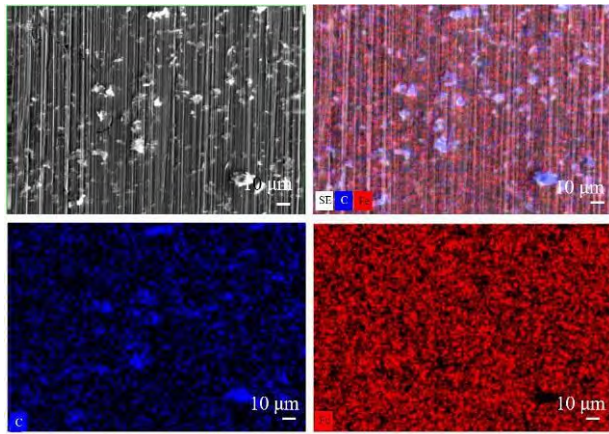
图 13 阴极宏观形貌和不同空间尺径下的微观形貌

Fig.13 Cathode macroscopic morphology and microscopic morphology at different spatial dimensions

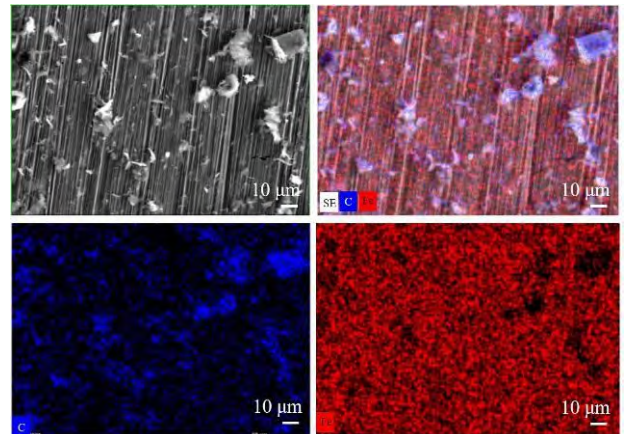
电极接近导电涂层区域的亮白色部分主要为烧蚀坑，而非接近导电涂层部分的偏深色附着物为喷溅产物沉积镀层。烧蚀坑尺寸在 10~100 μm 之间，与阴极电弧斑点尺寸类似。对比 Ti 与 SS304 电极烧蚀坑可以看出，SS304 电极的烧蚀坑尺径是大于 Ti 电极的，这可能与不锈钢较高熔点和低硬度有关。Ti 电极熔点为 1668 °C，而 SS304 电极熔点在 1370 °C 左右，且 Ti 的硬度远远大于 SS304 硬度，所以 SS304 更容易产生烧蚀坑。这表明不同电极材料的阴极烧蚀特性不同。从两电极的阴极电极非接近导电涂层区域的微观形貌可以看出，SS304 电极表面有着更多的颗粒状物质分布，这与宏观形貌是对应的。

为进一步了解电极表面沉积物，对其进行了元素分析，如图 14 所示。由图 14(a)、图 14(b)阴极表面附着粒子成分检测结果可以看出，电极表面沉积物质主要为碳，这是来自于导电涂层的碳材料，表明碳材料的粗糙度会对阴极形貌有着十分重要的影响。不光滑表面的突起会更容易放电，因此材料的喷溅理论上会增加放电概率，但容易造成电极表面放电不均匀，需要根据应用进行进一步选择。

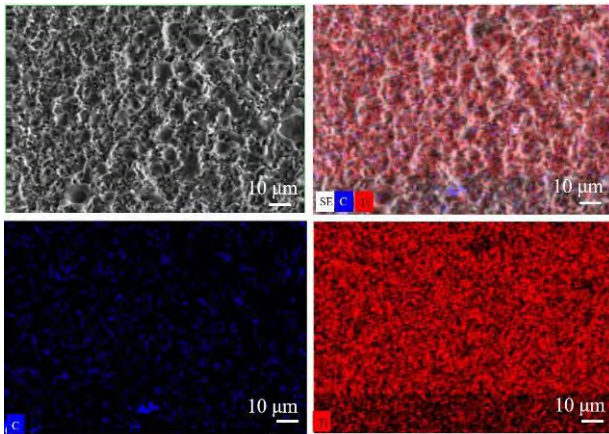
对两种电极材料阳极烧蚀沉积物的宏观、微观形貌及元素组成进行了表征，如图 15、图 16 所示。从图中可以看出，相对于 SS304 电极材料，Ti 材料



(a) SS304 阴极



(a) SS304 阳极



(b) Ti 阴极

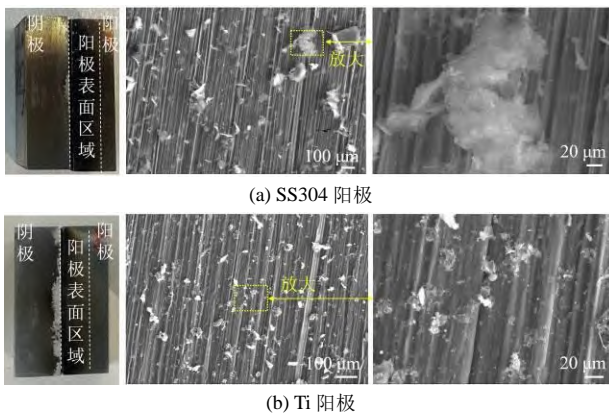
(b) Ti 阳极

图 14 阴极沉积产物成分分析

图 16 阳极沉积产物成分分析

Fig.14 Elementary analysis of cathodic deposition products

Fig.16 Elementary analysis of anode deposition products



(a) SS304 阳极

(b) Ti 阳极

图 15 阳极宏观形貌和不同空间尺径下的微观形貌

Fig.15 Anode macroscopic morphology and microscopic morphology at different spatial dimensions

3 结论

1) 真空沿面电弧放电的击穿(点火)阶段, 在“三结合点”(电极-真空-涂层)处放电最剧烈, 同时导电涂层上存在不规则亮斑(局部微小电爆炸)。燃弧阶段可达百微秒, 起初阳极放电强度明显高于阴极, 随后发生阴极烧蚀增强, 放电后期发生阳极喷溅现象, 前期阴极烧蚀喷溅与后期阳极喷溅烧蚀有着明显的不同。

2) 无磁场情况下, 沿面放电等离子体强度较弱、分布不均匀; 在外加磁场情况下放电持续性增强, 放电均匀性提高, 等离子体羽流增强, 因此磁场对推力产生至关重要。但等离子体羽流喷射强度并不完全与磁场大小成正相关, 相对于较大磁场(150 mT), 较小磁场(100 mT)下等离子体羽流向外喷射强度更大, 100 mT 磁场下等离子体羽流截面积可达无磁场时 2 倍。因此在设计推力器外加磁场时, 需要选择合适的磁场大小, 从而在最大程度上优化推力器的性能、增长推力器寿命。

在阳极的喷溅产物尺径小得多, SS304 电极表面有颗粒状附着物。可以发现阳极表面存在与阴极外周相似的沉积和附着, 其成分主要为碳, 以及尺径极小的电极材料成分, 并且含碳颗粒的密度较阴极更大。这说明阳极表面的喷溅产物主要来自于导电碳涂层, 并且凝固一层尺径极小的金属蒸气。

3) SS304 和 Ti 电极在放电前期辐射光主要为金属原子谱线, 放电后期导电碳涂层对光谱有更多贡献。SS304 和 Ti 电极下电极间隙喷溅产物在微观上呈现微米级无定形石墨形貌。两种材料电极间隙产物分布集中在中间区域, 但 SS304 相对于 Ti 电极在 Si 片上产生更明显的镀层, 且喷溅产物尺径更大。对电极附着粒子和烧蚀形貌的表征发现, 阴极表面烧蚀坑尺寸在 10~100 μm 之间, 不同电极材料微观形貌差异明显, SS304 电极的烧蚀坑尺径与喷溅粒子尺径均大于 Ti 电极。电极表面喷溅附着物为纳米颗粒, 且是来自于导电涂层的碳材料。

参考文献 References

- [1] BILEK M M M, MCKENZIE D R, TARRANT R N, et al. Plasma-based ion implantation utilising a cathodic arc plasma[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 156(1/3): 136-142.
- [2] SANDERS D M, ANDERS A. Review of cathodic arc deposition technology at the start of the new millennium[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 133-134: 78-90.
- [3] MINAMI T, IDA S, MIYATA T. High rate deposition of transparent conducting oxide thin films by vacuum arc plasma evaporation[J]. *Thin Solid Films*, 2002, 416(1-2): 92-96.
- [4] 于达仁, 刘辉, 丁永杰, 等. 空间电推进原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
YU Daren, LIU Hui, DING Yongjie, et al. *Fundamentals of space electric propulsion*[M]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology Press, 2014.
- [5] KEIDAR M, ZHUANG T S, SHASHURIN A, et al. Electric propulsion for small satellites[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2015, 57(1): 014005.
- [6] ZHUANG T S, SHASHURIN A, DENZ T, et al. Performance characteristics of micro-cathode arc thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(1): 29-34.
- [7] 米夏兹 Γ A. 真空放电物理和高功率脉冲技术[M]. 李国政, 译. 北京: 国防工业出版社, 2007.
MECЯИ Γ A. *Vacuum discharge physics and high power pulse technology*[M]. LI Guozheng, translated. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2007.
- [8] 拉弗蒂 J M. 真空电弧理论和应用[M]. 程积高, 喻立贵, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
LAFERTY J M. *Vacuum arcs theory and application*[M]. CHENG Jigao, YU Liguai, translated. Beijing, China: China Machine Press, 1985.
- [9] ANDERS A, SCHEIN J, QI N. Pulsed vacuum-arc ion source operated with a “triggerless” arc initiation method[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(2): 827-829.
- [10] 王雯倩, 刘向阳, 王帅, 等. 微阴极电弧推力器放电寿命特性研究[J]. *中国空间科学技术*, 2021, 41(3): 24-30.
WANG Wenqian, LIU Xiangyang, WANG Shuai, et al. Study on discharge life characteristics of micro-cathode arc thruster[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2021, 41(3): 24-30.
- [11] 耿金越, 秦宇, 龙军, 等. 微阴极电弧推力器工作性能影响因素研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(1): 157-163.
GENG Jinyue, QIN Yu, LONG Jun, et al. Study on influencing factors of working performances in micro cathode arc thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(1): 157-163.
- [12] BEILIS I I. Vacuum arc cathode spot motion in oblique magnetic fields: an interpretation of the Robson experiment[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(9): 093501.
- [13] 黄文栋, 耿金越, 严浩, 等. 微阴极真空电弧点火起弧及加速机理研究综述[J]. *空间控制技术与应用*, 2021, 47(4): 10-20.
HUANG Wendong, GENG Jinyue, YAN Hao, et al. Review on ignition and acceleration mechanisms in a micro-cathode arc thruster[J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(4): 10-20.
- [14] AU M, SCHEIN J, GERHAN A, et al. Magnetically enhanced vacuum arc thruster (MVAT)[C] // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, USA: AIAA, 2004: 2004-3618.
- [15] KEIDAR M, SCHEIN J, WILSON K, et al. Magnetically enhanced vacuum arc thruster[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2005, 14(4): 661-669.
- [16] ZHUANG T S, SHASHURIN A, BEILIS I, et al. Ion velocities in a micro-cathode arc thruster[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19(6): 063501.
- [17] 周思齐, 耿金越, 夏广庆, 等. 微阴极电弧推力器放电特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2019, 39(1): 46-52.
ZHOU Siqi, GENG Jinyue, XIA Guangqing, et al. Discharge characteristics of micro cathode arc thruster: an experimental study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, 39(1): 46-52.
- [18] ZHUANG T S, SHASHURIN A, CHIU D, et al. Micro-cathode arc thruster (μ CAT) with thrust vector control[C] // 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlanta, USA: AIAA, 2012: 2012-4103.
- [19] BRIEDA L, ZHUANG T, KEIDAR M. Towards near plume modeling of a micro cathode arc thruster[C] // 49th AIAA Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Jose, USA: AIAA, 2013: 2013-4120.
- [20] 耿金越, 熊子昌, 龙军, 等. 微阴极电弧推力器研究进展[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(3): 212-218, 231.
GENG Jinyue, XIONG Zichang, LONG Jun, et al. The research progress in the micro-cathode arc thruster[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(3): 212-218, 231.
- [21] YUSHKOV G Y, ANDERS A, OKS E M, et al. Ion velocities in vacuum arc plasmas[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(10): 5618-5622.
- [22] 王帅, 刘向阳, 赵子靖, 等. 微阴极电弧推力器羽流探针诊断研究[J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43(2): 47-54.
WANG Shuai, LIU Xiangyang, ZHAO Zijing, et al. Probe diagnosis of plume of micro-cathode arc thruster[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43(2): 47-54.
- [23] BARENGOLTS S A, MESYATS G A, TSVENOUKH M M. Initiation of ecton processes by interaction of a plasma with a microprotrusion on a metal surface[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2008, 107(6): 1039-1048.
- [24] ANDERS A, BROWN I G, MACGILL R A, et al. ‘Triggerless’ triggering of vacuum arcs[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1998, 31(5), 584-587.
- [25] 付继伟, 洪蓓, 隗功正, 等. 模拟雷击导体过程中脉冲电弧光-电联合诊断和损伤机制分析[J]. *强度与环境*, 2022, 49(5): 1-11.
FU Jiwei, HONG Bei, KUI Gongzheng, et al. Optical-electrical joint diagnosis on pulsed arc in simulated lightning strike process and its damage mechanisms[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2022, 49(5): 1-11.
- [26] HAN R Y, LI C, WANG K, et al. “Breakdown” of stratified electrical explosion products: Plasma development and its mechanical effect[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(10): 107119.
- [27] FRECHETTE M F, LAROCQUE R Y. Optical emission characteristics of a triple junction[C] // the 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. Boulder, USA: IEEE, 2004: 572-575.
- [28] MESYATS G A, SHPAK V G. Explosive electron emission from a ferroelectric surface initiated in triple junctions[C] // 2008 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in

- Vacuum. Bucharest, Romania: IEEE, 2008: 47-50.
- [29] 孙光宇, 张建威, 杨雄, 等. 真空沿面闪络全局模型与数值仿真综述[J/OL]. 高电压技术, 2023: 1-13[2023-07-19]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230275>.
SUN Guangyu, ZHANG Jianwei, YANG Xiong, et al. Review of global model and numerical simulation of surface flashover in vacuum[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-13[2023-07-19]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230275>.
- [30] 付思, 曹云东, 李静, 等. 真空金属蒸气电弧作用下阴极表面蚀坑形成过程[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 843-851.
FU Si, CAO Yundong, LI Jing, et al. Formation of crater on cathode surface in vacuum metal vapor arc[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 843-851.
- [31] 吴佳玮, 丁卫东, 韩若愚, 等. 大电流条件下气体火花开关电极烧蚀的研究进展[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3367-3379.
WU Jiawei, DING Weidong, HAN Ruoyu, et al. Review of electrode erosion in a spark gap switch under large pulsed currents[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3367-3379.
- [32] WU Y, CUI Y F, RONG M Z, et al. Visualization and mechanisms of splashing erosion of electrodes in a DC air arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(47): 47LT01.
- [33] POLK J E, SEKERA M J, ZIEMER J K, et al. A theoretical analysis of vacuum arc thruster and vacuum arc ion thruster performance[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2167-2179.
- [34] BUGAEV V A, DERNOVSKIJ V L, LOGATCHEV A A, et al. Emission spectra of high-current vacuum arc stabilized by axial magnetic field[C]//2008 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest, Romania: IEEE, 2008: 284-287.
- [35] SMYAGLIKOV I P, CHUBRIK N I, GONCHARIK S V, et al. Spectroscopic and probe diagnostics of carbon plasma flows of a pulse vacuum arc[J]. High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, 2010, 14(1-2): 157-163.
- [36] HAN R Y, LI C, ZHU W Y, et al. Optical emission and quenching process of a Cu wire explosion: a spectroscopy study[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(22): 225202.
- [37] 利伯曼 M A, 德格鲁特 J S, 托尔 A, 等. 高密度 Z 箍缩等离子体物理学[M]. 孙承伟, 译. 北京: 国防工业出版社, 2003.
LIBERMAN M A, DE GROOT J S, TOOR A, et al. Physics of high-density Z-pinch plasmas[M]. SUN Chengwei, translated. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2003.



BAI Jie

白洁

2000—, 女, 硕士生

主要从事放电等离子体、金属丝电爆炸等方面的研究工作

E-mail: 970266420@qq.com



WU Jiawei

Ph.D.

Senior engineer

Corresponding author

吴佳玮(通信作者)

1991—, 女, 博士, 高工

主要从事脉冲功率技术、气体开关、柔性直流输电技术等方面的研究工作

E-mail: jiawei-wu@geidco.org

收稿日期 2023-01-17 修回日期 2023-07-19 编辑 曹昭君