离子推力器非预期电击穿的主要诱发因素及机制

张天平^{a,b},张雪儿^{a,b},蒲彦旭^{a,b},冉文亮^{a,b},赵志伟^{a,b}
(兰州空间技术物理研究所 a.真空技术与物理重点实验室;
b.甘肃省空间电推进技术重点实验室,兰州 730000)

摘要:离子推力器的非预期电击穿直接影响其工程应用的工作可靠性。在阐明非预期电击穿基本问题现象及后 果的基础上,从电极表面金属微凸结构、低气压环境、等离子体环境、电极间漂浮颗粒物、电极间绝缘体(层)等五个方 面梳理了诱发非预期电击穿的主要因素;针对主要诱发因素具体讨论了场增强电子发射、低气压放电、材料热蒸发及 电离、电子反流、带电粒子碰撞、阴极表面电弧、绝缘体表面闪弧、绝缘层损伤等导致电极间局部或整体电击穿的机 制,简要展望了离子推力器非预期电击穿问题的深化研究主要方面。

关键词:非预期电击穿;影响因素与机制;离子推力器 中图分类号:V439⁺.1 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2021.01.001

文章编号:1006-7086(2021)01-0001-11

Main Causes and Mechanisms of Unexpected Breakdowns of Ion Thruster

ZHANG Tianping^{a,b}, ZHANG Xueer^{a,b}, PU Yanxu^{a,b}, RAN Wenliang^{a,b}, ZHAO Zhiwei^{a,b} (a. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, b. Key Laboratory of Space Electric Propulsion Technology of Gansu Province, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Unexpected breakdowns of ion thruster affect its reliability under operating conditions. Upon illustrating the phenomena and consequences of these breakdowns, their main causes, including protrusions on electrode, low-pressure gases, plasma, micro-particles, and insulators, are discussed. Their mechanisms are introduced concerning field emission, low-pressure gas discharge, electrode vaporization and ionization, electron backstreaming, micro-particle impact, cathodic vacuum arc, flashover of insulators, and dielectric breakdown. A summary is given with an outlook on further study of unexpected breakdowns of ion thruster.

Key words: unexpected electric breakdown; cause and mechanism; ion thruster

0 引言

离子推力器在具有比冲高、性能调节便利、适用范围广、技术成熟度好等显著优势的同时^[1-2],一 直存在非预期电击穿(打火)问题。各国对非预期 电击穿的称谓不尽相同:美国为束流循环(beam recycle)^[3-5]、英国为束流错误(beam trip)^[6-7]、德国为束 流中断(beam out)^[8-9]、日本为高压击穿(HVBD)^[10-11]。 国内外离子电推进技术发展、工程研制和航天器应 用的实践证明,无论是在地面模拟环境条件下还是 在空间环境条件下,离子推力器工作过程中都会出 现非预期打火^[2-11]。通过控制及防护能够将非预期 打火的频次和影响降低到航天器工程可接受的程 度,并由此保证离子电推进系统完成预定航天任务 的可靠性和寿命^[3-4,6]。但离子推力器非预期打火问 题难以完全消除,因其根源为推力器内在工作特性 及多种因素的复杂耦合。

基金项目:甘肃省科技计划资助(18JR3RA412)

作者简介:张天平,研究员,主要从事空间电推进技术与工程研究。E-mail:ztp510@aliyun.com。

收稿日期:2020-04-15

引用本文:张天平,张雪儿,蒲彦旭,等.离子推力器非预期电击穿的主要诱发因素及机制[J].真空与低温,2021,27(1):1-11.

ZHANG T P, ZHANG X E, PU Y X, et al. Main causes and mechanisms of unexpected breakdowns of ion thruster[J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(1):1-11.

我国离子电推进经过40多年的发展,已经步入 航天器工程应用并不断扩展的关键时期¹¹²¹,正确理 解离子推力器非预期打火问题、准确把握非预期打 火机制及规律、针对性采取工程控制与防护措施具 有非常重要的意义。本文将从打火问题基本概念、 主要影响因素及机制、有待深化研究的机制问题等 方面对离子推力器非预期打火进行比较完整的阐 述,以期促进对该问题进行从深化机制到提出工程 解决措施的系统研究,为我国离子电推进在航天工 程中的成功应用提供保证。

1 非预期电击穿基本问题

1.1 术语

为便于对离子推力器非预期电击穿进行准确 描述,首先定义几个本文用到的术语。

(1)电击穿:原本绝缘良好的电极之间出现电流且电压快速降低的现象;

(2)电弧:电极之间击穿电流在负电位电极表 面形成的斑点弧光; (3)打火:电击穿或电弧从产生、发展到熄灭的 完整过程;

(4)非预期电击穿(打火):离子推力器工作中 不期望发生的电击穿(打火)。

本文在表述现象时多用打火,在表述机制时多 用电击穿。

1.2 离子推力器非预期电击穿(打火)现象

离子推力器和电源处理单元(PPU)各输出电源 之间的配套关系如图1所示^[13]。离子电推进正常工 作时,其阳极、屏栅、放电阴极等电极处于屏栅电源 的正高电位(一般为1000 V以上),统称为高电位电 极;其外壳和中和器处于近似地(零)电位、加速栅 处于加速电源的负电位(一般为-200 V以下),统称 为低电位电极。高电位电极与低电位电极之间存在 1000 V以上的电位差,而屏栅和加速栅电极典型间 距为1 mm左右、阳极与外壳电极最小间距为3 mm、 屏栅与外壳电极最小间距为4 mm,高电位差和小 间距使得高、低电极间存在较强的电场。



图 1 离子推力器与PPU各输出电源的连接关系图 Fig.1 Connection between ion thruster and PPU

在离子推力器工作可靠性和安全性设计中,已 经为电极间电场强度保留了避免电击穿发生的安 足够的全裕度,也就是说在正常工作条件下电极间 是不会发生电击穿的。但在相关因素诱导或耦合作 用下,推力器电极之间确实发生了电击穿(打火), 并造成离子推力器正常工作状态被干扰或中断。

离子推力器的非预期打火一般按照发生打火 的组对电极进行分类,主要包括屏栅与加速栅之间 打火、屏栅与外壳(地)之间打火、阳极与外壳(地)之 间打火、加速栅与外壳(地)之间打火等。如果是三 栅极会有更多类别,如加速栅与减速栅之间打火。 1.3 非预期打火的后果

离子推力器非预期打火的影响及危害是多方 面的,如果不进行有效控制,严重者会导致航天器 任务失败。

(1)对航天器任务而言,非预期打火将导致实际输出推力(冲量)小于预期水平、预定的正常工作被临时中断、连续稳定推力状态被破坏等情况。针对电推进不同的具体任务,其影响严重程度差别较大。对GEO卫星位保任务,打火产生的单次位保影响可以通过短期工作策略微调得到完全补偿,因此影响较小;对无拖曳控制任务,打火造成的空间和时间节点的数据损失无法得到有效补偿,因此会影响有效数据链的连续性;对深空探测轨道巡航任务,在长期旅途中进行部分工作段的调整就可以消除影响。

(2)对离子电推进系统而言,非预期打火可导 致系统工作中断、PPU单机失效、系统柔性变差、工 作可靠性和寿命降低等后果。其中系统工作中断 包括安全控制主动中断和放电熄灭被动中断。PPU 失效的原因之一是推力器打火产生的短路大电流 脉冲导致 PPU电路中电压、电流快速变化,电路上 元器件承受更大的应力;对多台推力器同时工作的 系统,不同推力器的非预期打火会直接导致系统工 作不兼容,反过来影响到推力器和 PPU之间配置的 柔性设计;非预期打火导致的系统工作频繁中断、 电流/电压脉冲对 PPU电路元器件的损伤、系统兼容 性或柔性变差都直接关系到系统工作的可靠性和 寿命。

(3)对离子推力器本身而言,除了可恢复的束 流中断外,非预期打火可导致中和器熄灭、放电室 熄灭、电极表面损伤、栅极之间永久短路等情况发 生。中和器和放电室熄灭是由于非预期打火破坏 了维持稳定放电的条件,主要包括电压条件、电流 条件、等离子体密度条件等。例如阳极对地打火时,阳极电压严重降低直接导致放电室正常放电熄灭;电极表面损伤源于打火过程中能量积累产生的材料局部蒸发,以及表面损伤与打火频次之间的恶性循环。对间距很小的栅极,严重打火或持续电弧不仅产生损伤,而且很容易使得蒸发物局部沉积或栅极损伤产生的毛刺在栅极之间形成搭桥短路,这种短路如果无法消除会导致推力器永久失效。

1.4 真空电击穿基础理论

首先了解由电极材料特性和电极间电场强度 决定的真空电击穿现象及机制。图2(a)为研究真 空电击穿的经典实验系统^[14],在高真空环境下,表面 光洁的球型和平板电极、脉冲电路(高压电源、1 MΩ 充电电阻和电容器C)组成充电回路,电容器C、限 流电阻R、真空继电器和球板电极组成放电回路。 采用球板电极是为了消除击穿区域的边缘效应,使 电极间距精确可调。实验时,真空继电器闭合后电 容器充电,电极间电压持续升高,直到发生电击穿, 击穿电弧积累的能量决定于电容器电容的大小。 图2(b)为钼材料电极的一次真空电击穿电流波形 测量曲线,继电器关闭后充电0.1 ms发生真空击 穿,峰值电流达到30 A,其后电弧电流逐渐减小到 3 A时熄灭,电弧维持了0.3 ms的周期。





高真空下电极之间没有气体碰撞电离,因此真 空电击穿的决定因素是场发射电子^[15],真空条件下 场发射电流*I*_{FE}与电场强度*E*之间满足F-N方程,常 用表达式为:

$$\ln\frac{I_{\rm FE}}{E^2} = \ln\left[\frac{1.54 \times 10^{-6} A_{\rm e} 10^{4.52\Phi^{-0.5}}}{\Phi}\right] - \frac{2.84 \times 10^9 \Phi^{1.5}}{E} \quad (1)$$

式中:**Φ**为电极材料的电子发射功函数;A。为电子发 射有效面积。真空电击穿的主要机制为:在电极间 的强电场作用下,负电极内的电子突破表面约束 (功函数)形成电子发射(称为场发射),该发射电子 被电场加速后碰撞于正电极,当沉积在正电极上的 场发射电子流通量达到阈值时就能够蒸发正电极 材料,蒸发材料原子与场发射电子碰撞电离导致电 极间击穿(电弧)。

1.5 诱发非预期打火的主要因素

离子推力器非预期打火本质上是广义的电击 穿及其电弧现象。对钼、钛、碳、铝等常用推力器电 极材料,图3给出了实测的不同电极材料的真空击 穿电场强度*E*_b,纯粹的电极间高真空电击穿场强至 少须达到80 kV/mm以上,击穿场强还与晶体结构 相关^[14]。离子推力器实际工作条件下的电极间场强 远没有这么高,可见非预期打火的发生往往耦合了 其他影响因素,为此有必要先梳理出离子推力器工 作时可能诱发非预期打火的主要因素。





结合离子推力器具体工作过程及相关环境,在 供电和供气条件正常、推力器结构稳定的前提下, 可能导致非预期打火发生的主要因素包括:

(1)电极表面金属微凸结构。电极表面存在初 始缺陷,工作过程中离子溅射、电弧损伤等也会形 成表面微凸结构。 (2)低气压环境。由于非完全电离的推进剂气体、环境气体、材料自身出气等气源条件,在电极之间形成低气压环境。

(3)等离子体环境。离子推力器放电室和栅极 存在工作等离子体,电极之间可能出现等离子体 泄漏。

(4)电极间漂浮颗粒物。离子溅射沉积物的剥 离及漂浮,周围环境颗粒物的侵入。微颗粒物类型 包括导体和绝缘体。

(5)电极间绝缘体(层)。电极间存在结构支撑 绝缘器,污染、氧化等过程形成的电极表面绝缘层 (岛)。

(6)以上因素的组合,包括多因素共存诱发和 相互耦合诱发。

2 电极表面金属微凸诱发电击穿的机制

2.1 电极表面粗糙化的场发射增强效应

真空电击穿实验表明,击穿电压与电极表面粗 糙度状态密切相关,表面粗糙化会导致击穿电压显 著降低。机制分析表明,导致粗糙化表面电击穿电 压降低的主要原因是表面微凸或锐化微结构:在施 加同样电压条件下,微结构尖端产生了局部电场增 强效应,如图4所示,更高的电场强度使得场发射增 强、击穿电压降低。



图 4 电极表面微凸产生的场增强效应示意图 Fig. 4 Field emission from a protrusion on the electrode

为了描述这类微凸或锐化结构对场发射电流 的影响,在F-N方程式(1)中引入了场增强因子 β_{FE},其定义为式(2)^[16-17],对应的场增强F-N方程为 式(3):

$$E_{\rm m} = \beta_{\rm FE} E = \beta_{\rm FE} \frac{V_{\rm T}}{l_{\rm g}}$$
(2)

$$\ln \frac{I_{\rm FE}}{V_{\rm T}^{2}} = \ln \left[\frac{1.54 \times 10^{-6} A_{\rm e} \beta_{\rm FE}^{2} 10^{4.52 \Phi^{-0.5}}}{\Phi l_{\rm g}^{2}} \right] - \frac{2.84 \times 10^{9} l_{\rm g} \Phi^{1.5}}{\beta_{\rm FE} V_{\rm T}}$$
(3)

式中:*l*_s为电极间距;*V*_T为总加速电压。场增强F-N 方程已经被大量试验证明是正确和有效的。利用 试验数据绘制式(3)关系曲线,通过斜率可以得到 场增强因子,再通过截距得到有效发射面积。图5 所示为典型的场增强F-N曲线^[17],随电场增强,场发 射被激发(对应图中从右到左的激活过渡区),在图 中直线区形成场增强电子发射,当电场增大到击穿 电场阈值时产生电弧(对应图中左端)。



Fig. 5 F-N curve of field emission

2.2 金属微凸结构诱发电击穿机制

栅极表面微凸结构引发电击穿的基本机制为: 在外加电场中微凸结构的尖端电场大幅增强,强电 场对应更大的发射电流,足够大的发射电流产生焦 耳热使微凸结构局部蒸发,在微凸周围形成局部低 气压环境,发射电子和金属蒸气碰撞发生电离,电 离过程产生的离子进一步加剧微凸结构局部热蒸 发效应,由此形成不可逆的焦耳加热、电子发射增 强、电阻增大和离子沉积、焦耳热进一步增强、蒸发 进一步加速的循环过程,最终导致电极间电击穿。

一个简化模型如图6所示,加速栅表面微凸结构为半径*R*₁、高度*H*₁的圆柱,场发射电流在顶端(电场最强)出现,发射电流产生的焦耳热使微凸结构温度升高,当温度达到沸点后开始气化,形成的微凸结构蒸气与发射电子碰撞导致电击穿(电弧),栅极之间电流显著增大。由此可得到全部微凸结构爆破性熔化和蒸发产生电击穿的发射电流及焦耳热的条件为¹¹⁸¹:

$$I_{\rm FE}^{2} \frac{H_{\rm I}}{\pi \sigma_{\rm I} R_{\rm I}^{2}} \Delta t = \rho_{\rm I} \pi R_{\rm I}^{2} H_{\rm I} (c_{\rm Im} \Delta T_{\rm Im} + c_{\rm Ie} \Delta T_{\rm Ie} + k_{\rm Im} + k_{\rm Ie}) (4)$$

式中:下标1表示属于微凸结构;下标m表示熔化; 下标e表示气化;σ、ρ、c、k分别为电导率、密度、热容 和相变焓(潜热);ΔT为熔点和工作温度增量;Δt为 微凸加热和蒸发时间。栅极表面微凸结构场增强 效应导致非预期电击穿所涉及的变量多达10多个, 可见相关过程的复杂性。



图 6 加速极表面圆柱微凸的场增强发射效应示意图 Fig. 6 Field emission from a cylinder protrusion on the accelerator grid

具体量化分析表明,要在几纳秒内实现微凸结构的爆破性蒸发,需要的发射电流密度要比空间电荷限制下的电流密度至少高出两个量级,为此提出了单极电弧模型机制^[19]。电极间有电荷和没有电荷的电场分布存在差别,因为空间电荷自身产生的电场会减弱原有电场,这就是空间电荷效应。例如平行板电极之间有单荷正离子电流*J*时,电极间电势*V*分布满足式(5)^[20]:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{J(x)}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{m_i}{2e}} \frac{1}{\sqrt{V}}$$
(5)

求解该方程得到对应的电场分布表达式为[20]:

$$E(x) = \frac{4V_0}{3D} \left(\frac{x}{D}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(6)

式中:V₀为电极间的电位差;D 为电极间距;x 为相对 阴极板的距离。可见空间电荷效应显著改变了原 有平板电极之间的均匀电场,由此可得到熟知的离 子推力器栅极系统引出束电流极限。正是空间电 荷效应对场发射最大电流密度的这种限制作用,给 真空击穿中场发射电流瞬间蒸发微凸尖端这一理 论增加了疑点¹¹⁹¹。

3 低气压环境诱发电击穿的机制

3.1 气体放电的帕那定律

气压对电击穿的影响源于早期低气压气体放 电研究:当电极间存在气体时,击穿电压U_b取决于气 体压力p和电极间距d的乘积,即满足帕邢定律^[21-22]:

$$U_{\rm b} = \frac{\mathrm{B}pd}{\ln(\mathrm{A}pd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]} \tag{7}$$

式中:A、B为与气体种类相关的常数;γ为电极材料 二次电子发射系数。帕邢定律已经被大量试验结 果所验证,式(7)表达的击穿电压与乘积*pd*的关系 称为帕邢曲线。

可通过如下推导过程了解帕邢定律的机制。 击穿电压定义为实现自维持放电的电压,气体实现 自维持放电的条件判据为:

$$\gamma \left(e^{\alpha d} - 1 \right) = 1 \tag{8}$$

式中: a 为电离系数。进一步假设每个电子经过平 均自由程后都会通过碰撞失去能量、每个电子碰撞都 产生电离,并且电极间电场是均匀的,则通过式(8) 可以推导出击穿电压表达式一式(7)^[2]。由此可见, 帕邢定律反映了电极间电子扩散和漂移损失与阴 极产生发射电子的平衡关系,且电子和中性原子的 碰撞电离概率、离子碰撞电极产生发射电子的概率 均正比于电场、反比于气体数密度,阴极材料决定 了电子发射系数,因此对击穿电压影响较大。

3.2 低气压诱发电击穿的机制

气体放电机制研究将气体击穿分为一次击穿 过程和二次击穿过程^[23]。一次击穿过程包括电离和 复合碰撞,放电过程中气体内总自由电子密度受 控;二次击穿过程是提供自维持(正反馈)的放电, 即电离以击穿达到过程顶点。如果气体放电二次 过程在气体中激活,击穿将以雪崩式(Streamer)机 制发生,雪崩式击穿机制以较高气压和较大间距为 特征;如果二次过程在电极之间激活,击穿则以汤 森(Townsend)机制发生,汤森击穿机制以较低气压 和较小间距为特征。无论哪种机制导致击穿发生, 击穿电压都是pd乘积的函数(即帕邢定理)。

帕邢定理以具有最小值的非对称U型曲线为特征,图7所示为空气的帕邢曲线,曲线最小值处对应的电离效率最大,最小值附近气体击穿为汤森机制,最小值右边为雪崩式机制。pd更小处由于原子密度减小,部分阴极发射电子在发生碰撞电离前被阳极吸收;pd更大处由于原子密度增大,部分电离过程产生的离子在到达阴极前与中性原子发生碰撞而损失能量,阴极发射电子效率降低。

离子推力器中的低气压电击穿绝大多数属于 汤森机制类型,即当pd处于中等值时,对应的间距d 小于电子自由程,电极上的二次击穿过程主导气体 中的二次击穿过程,计算击穿电压的适用条件为汤森判据^[23-24]:

$$\gamma \int_{0}^{d} \exp\left[\int_{0}^{x} (\alpha - \eta)\right] \alpha dx = 1$$
(9)

式中:η为电子附着系数。低压气体来源包括气体 解吸、污染物挥发、材料出气、未电离的推进剂气 体、外部气体扩散进入或它们的组合。初始电子源 包括电极热发射、场发射、射线激发或电离等,发生 击穿的位置在帕邢曲线最小值及其左侧附近。



当*pd* 很小时,间距小于电子自由程,电极材料 蒸发导致击穿,对应真空击穿机制,正如第2节所讨 论,真空条件下由于电极材料蒸发导致的电击穿, 只与过程中的低气压相关。当*pd* 较大时,气体中的 二次击穿过程主导电极上的击穿,对应雪崩式击穿 机制,计算击穿电压的适用条件为雪崩判据^[24-25]:

$$\int (\alpha - \eta) \mathrm{d}x = 10.5 \tag{10}$$

雪崩击穿的击穿电压约为发射特征电压 V-4的 2倍, V-4是发射电流为10⁻⁴ A时对应的电压。

4 等离子环境诱发电击穿的机制

4.1 等离子鞘层诱发的电击穿

鞘层结构是电极间存在的等离子体中对电场 分布影响最大的因素。一方面,该鞘层承担着电极 间的大部分电压降,能够增强阴极电子场发射和热 发射能力;另一方面,该鞘层一旦与导体微凸结构、 带电绝缘体表面等发生耦合作用,会对电极表面附 近的击穿过程产生重要影响^[26]。电极间为高电压 时,不满足波姆条件的阴极鞘层厚度及阴极表面电 场强度表达式为^[27]:

$$d_{\rm sh} = \frac{2}{3} \left(\frac{2\varepsilon_0^2 V^3}{m_{\rm i} q_{\rm i} n_{\rm i}^2 v_{\rm i0}^2} \right)^{\frac{1}{4}}$$
(11)

$$E(d_{\rm sh}) = \left(\frac{6m_{\rm i}q_{\rm i}n_{\rm i}^2 v_{\rm i0}^2}{\varepsilon_0^2}\right)^{\frac{1}{3}} d_{\rm sh}^{\frac{1}{3}}$$
(12)

式中:m_i为离子质量;q_i为离子电荷;v_{i0}为离子进入鞘 层的初速度;n_i为数密度;V为电极间电压。对典型 离子电推进等离子体进行的计算表明,鞘层内电场 强度可达到10⁶ V/m。

4.2 等离子体泄漏诱发的电击穿

离子推力器发生来自内部或外部的等离子体 泄漏可直接导致打火。内部等离子体泄漏主要源 于推力器热循环导致的密封结构破坏;外部等离子 体泄漏主要源于对环境等离子体的防护不当,中和 器电子反流引发的栅极间电击穿最为典型。

离子推力器发生中和器电子反流的条件为^[13]: 当加速栅负偏置电压不够高或加速栅孔径随交换 电荷离子腐蚀变到足够大时,由屏栅和加速栅形成 的电势分布在加速栅孔中心会呈现相对中和器为 正的状态,中和器发射的高能电子会直接通过加速 栅孔进入栅极系统,称为电子反流现象。阻止电子 反流的加速栅电压 V_a的最小绝对值与加速栅孔半 径 R_a的关系式为:

$$|V_{a}| = \frac{V_{s}}{\pi \frac{\sqrt{L_{g}^{2} + R_{s}^{2}}}{R_{s}} e^{\frac{D_{s}}{2R_{s}}} - 1}$$
(13)

式中:V。为屏栅电压;D。为加速栅厚度;R。为屏栅孔 半径;L。为栅间距。中和器电子反流一旦开始就是 一个不可逆过程:电子进入栅极进一步升高加速栅 孔中心的电位,使得更多电子反流进入。进入栅极 后的大量电子加速到上千电子伏并被屏栅极吸收, 该能量积累会迅速加热屏栅局部位置,导致局部热 形变和材料蒸发,最终导致栅间电击穿。

一个简单估算模型为:假设从加速栅单孔径截 面反流的电子电流 *I*_s被屏栅等面积吸收,忽略屏栅 热传导效应,经简单推导可得到屏栅截面温度升高 Δ*T*_s与反流时间Δ*t*_{is}的关系:

$$\Delta T_{s} = \frac{I_{\rm bs} V_{s} \Delta t_{\rm bs}}{\pi R_{a}^{2} D_{s} \rho_{s} c_{s}} \tag{14}$$

以钼材料为例,取屏栅电压 V_s 为1000 V, R_s 为 0.6 mm, D_s 为2 mm,反流(电子)电流 I_{ls} 为0.02 A, ρ_s 为10.2 g/cm³,热容 c_s 为0.25 J/gK,计算结果表明:1 s 时间的电子反流可使屏栅局部温度升高3472 K,远超出其沸点温度,足以产生蒸气和放电击穿。

4.3 类真空弧等离子体源诱发的电击穿

源于真空阴极电弧等机制,阴极表面产生了半径为R的半球形初始等离子云,如图8所示。在R<<

d、初始离子能量密度远大于电场能密度、等离子云膨胀为各向同性等条件下,求解泊松方程得到电极间的电子电流为^[28]:

$$i = 4\pi\varepsilon_0 \eta \sqrt{\frac{m}{e}} \left(\frac{RV}{d}\right)^{\frac{3}{2}} = 4\pi\varepsilon_0 \eta \sqrt{\frac{m}{e}} (RE)^{\frac{3}{2}}$$
(15)



图 8 阴极表面初始等离子体云示意图 Fig. 8 The geometry of the primary plasma cloud

该初始等离子体诱发电极间电击穿的条件为: 等离子云发射的电流应达到由阴极材料决定的某 阈值 *i*_{th},且设想产生初始等离子体云的入射能量 *w*₀ 全部转化为阴极材料蒸发和电离的能量,由此推导 出激发初始等离子体云并诱发电击穿的入射能量 为^[28]:

$$w_{0} = \frac{\sqrt{2\pi} i_{\rm th}^{3} m \left(w_{\rm i} + w_{\rm v} + kT_{\rm e} \right)}{3EZ\eta_{1}^{2}e^{2} \sqrt{\frac{kT_{\rm e}}{m}} \left(\frac{m i_{\rm th}^{3}}{\eta_{1}^{2}e} \right)^{\frac{2}{3}}}$$
(16)

式中:w_v为阴极原子升华能;w_i为Z阶平均电离能, 均为材料对应的真空弧试验数据。

5 其他因素诱发的电击穿

5.1 金属颗粒物诱发的电击穿

假设金属微颗粒物开始时接触于负电极表面, 如图9所示,受电极间电场的影响,颗粒物表面带 电。球型颗粒物的带电量为^[29]:

$$q = -\frac{2\pi^3 \varepsilon_0 r^2 U_0}{3d} \tag{17}$$

在空间微重力条件下,该带电颗粒受到电场力 作用向阳极运动并碰撞于阳极,获得的最大速度 为^[30]:

$$v_{\rm p} = \sqrt{\frac{9.9\varepsilon_0 U_0 E_{\rm max}}{p_{\rm p}}} \tag{18}$$

式中: ρ_p 为微球颗粒的密度; E_{max} 为微颗粒极化带电时最大表面电场。例如0.1 μ m半径、50 kV电压下速度可达到500 m/s以上。





当碰撞能量高于一定阈值时,在碰撞电极表面 产生由溅射物低气压环境导致(诱发)的电击穿,文 献[31]讨论了电极板上微凸结构对金属颗粒物碰撞 速度及溅射结果的显著影响。绝缘体颗粒物极化 带电后,其运动行为与金属带电颗粒具有相似性。

5.2 绝缘体表面闪弧诱发的电击穿

大量试验结果表明,真空条件下由固体绝缘体 支撑的电极间击穿电压往往会低于无绝缘体情况, 而绝缘体材料的击穿电压高于真空击穿电压,研究确 认是发生在绝缘体表面的所谓闪弧(flashover)现象 所致^[32-34]。试验发现由绝缘体表面闪弧导致的击穿 电压主要取决于绝缘器外形和性能(纯度、出气、表 面电导等),且阴极电极与绝缘体之间的连接状态对 击穿电压的影响远大于阳极与绝缘体的连接状态。

绝缘体表面闪弧过程分为起源、发展和击穿三个 阶段,如图10所示。起源阶段是在绝缘体、电极(负 电极)和真空交界的三结区发生电极的电子发射, 包括场致(场增强)和热电子发射。发展阶段为绝 缘体表面的二次电子发射雪崩,又称为绝缘体表面 电子发射瀑布,这是一个电子碰撞表面、表面产生 二次电子发射增益、更多电子碰撞表面的发射电子 雪崩式快速增长过程。击穿阶段为电子轰击表面 导致表面的吸附气体解吸或表面材料蒸发,最终产 生低气压放电击穿。

一个基于吸附了单层气体的绝缘体表面闪弧 真空击穿电压的计算公式为^[34]:

$$V_{\rm B} = \left[\frac{M_{\rm er} A_{\rm 1} v_{\rm 0} el}{2\gamma \varepsilon_{\rm 0} v_{\rm e} \sqrt{2A_{\rm 0}/(A_{\rm 1} - A_{\rm 0})}} \right]$$
(19)

式中:M_e为产生击穿的解析气体临界总量;A₁为电 子碰撞能量;A₀为电子发射能量;v₀为解吸气体平均 速度;l为绝缘体长度;γ为解吸概率;v_e为平均电子 速度。



图 10 绝缘体表面闪弧发展过程图 Fig. 10 Physical processes involved in insulator surface flashover

就二次电子发射瀑布过程而言,发射电子以初 速离开绝缘体表面,必须有改变电子轨迹的物理机 制使其回来碰撞于表面:绝缘体表面带电、位移电 流产生表面磁场都可以实现电子轨迹反流。一个 针对平行板电极间柱型绝缘体的位移电流产生的 表面磁场如图11所示,磁感应强度大小为^[35]:

$$B = \frac{\mu_0 C}{2\pi a} \cdot \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \frac{\mu_0 C E_0 d}{2\pi a\tau}$$
(20)

式中:C是绝缘体的电容;d为绝缘体长度。计算分析表明,当电压变化速率足够大时二次发射电子轨迹可以偏移并再次碰撞表面。





5.3 电极表面绝缘层诱发电击穿

为增大离子推力器由内向外的热辐射,阳极、

外壳等电极往往采取表面阳极化处理或镀膜处理 以提高表面发射系数,结果导致金属电极表面被绝 缘层覆盖。电极表面局部氧化、溅射沉积等也会导 致类似结果,形成金属电极表面的绝缘岛分布。一 般来说,电极表面绝缘层的存在有助于提高真空条 件下电极间击穿电压阈值¹¹⁴,对防止电极间打火产 生有利的作用。但在局部情况下,电极上的绝缘层 会成为导致电击穿的诱发因素,金属电极表面绝缘 层的存在会以多种机制诱发电击穿:

(1)如果电极表面存在局部绝缘层或绝缘岛, 等离子体环境中该绝缘层(岛)类似于电容器,等离 子体对绝缘层充电,绝缘层电荷不断累积,直到其 内部场强超出击穿阈值时绝缘层被击穿,例如铝氧 化层在低轨等离子体环境下的击穿电压临界值为 70 V^[36]。

(2)绝缘体与电极之间有空隙时,空隙内电场 明显增强更易发生低气压放电,由此导致局部电击 穿,结果如图12(a)所示。

(3)绝缘层与电极微凸结构耦合。如图 12(b) 所示,金属电极场增强发射的电子进入绝缘层并产 生绝缘层分子(原子)的倍增电离效应,包括绝缘层 内形成的空穴增强局部电场^[37],导致绝缘层发生雪 崩击穿。





如果以上局部击穿产生的瞬态大电流足以蒸

发和电离局部绝缘层,可直接诱发或通过二次耦合 效应诱发电极间击穿。

6 展望

无论是地面试验还是在空间工作条件下,离子 电推进都会发生非预期打火问题,通过分析发现, 离子推力器非预期打火的影响因素多、机制复杂、 耦合性强。并且随着离子推力器比冲性能的提升,束 电压会进一步提高,相应的非预期打火问题会变得 更加突出。由此可见,持续深入地开展离子电推进 非预期打火的机制研究,不仅是保证成熟产品工程应 用可靠性的迫切需求,更是研发新一代超高比冲离 子电推进的必然要求。主要研究包括如下方面:

(1)多因素耦合机制研究^[38-40]。在离子推力器 的设计中,单个影响因素的抗击穿裕度都是足够 的,但实际工作时却无法彻底杜绝电击穿事件的发 生,显然是多因素随机耦合的结果。本文对单一因 素影响机制的分析和量化估算也表明,只有理解了 多因素的初始诱发和过程发展等耦合机制,才能完 全解释实际发生的非预期打火。

(2)随机偶发特性研究^[41-43]。离子推力器非预 期电击穿的偶发特性非常突出,诱发因素较多、各 因素参数分布范围较宽、各因素之间相互耦合随机 性大等都是导致这种不确定的主要原因。针对击 穿随机性的深入研究,不仅需要基于诱发机制的正 确物理模型,更需要强有力的数学工具来进行复杂 耦合过程概率分析。

(3)数值计算与专项测试有机结合研究"44-47]。真实 离子推力器工况下的非预期打火测试在实施中存 在较大困难,越来越高效的数值计算方法成为更有 效的研究手段,计算仿真和专项试验的有机结合正 在成为深化研究的主要方法,由此可显著地推进对 问题的研究从定性到定量的转化。

(4)特征参数研究^[48-50]。非预期电击穿的时间 (周期)、打火频次、击穿电流峰值、推力器各电极参 数响应等是区分、判定不同因素导致击穿或耦合演 化的主要特征量,也是进行量化分析和评价的核心 参数,获取和分析这些特征参数非常关键。

(5)综合研究支撑工程应用^[51-53]。离子推力器 的多电极结构、多诱发因素、多工况条件、长期工作 磨损效应等情况,使得在工程应用中解决打火问题 非常困难。一种有效的程序方法就是通过综合研 究,首先确认第一(耦合)诱发因素及其机制,采取 有效措施显著降低其影响程度,然后确认新的第一 诱发因素及其机制并采取措施,以此类推直到非预 期打火频次及危害程度达到工程可接受。

参考文献:

- [1] 张天平, 张雪儿. 离子电推进的航天器应用实践及启示[J]. 真空与低温, 2019, 25(2):73-81.
- [2] 张天平, 耿海, 张雪儿, 等. 离子电推进技术发展现状与未 来[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 88-96.
- [3] PIFIERO L R. Recycle requirements for NASA's 30 cm xenon ion thruster[R]. NASA TM-106668, 1994.
- [4] CHARLES E G. In-flight operation of the dawn ion propulsion system through completion of dawn's primary mission[R]. AIAA 2016-4539, 2016.
- [5] YIM J T. Update of the NEXT ion thruster service life assessment with post-test correlation to the long-duration test[R]. IEPC-2017-061,2017.
- [6] WALLACE N C. The GOCE ion propulsion assembly–lessons learned from the first 22 months of flight operations[R]. IEPC– 2011–327, 2011.
- [7] WALLACE N C. Testing of the Qinetiq T6 thruster in support of the ESA Bepicolombo mercury mission[R]. Space Propulsion 2004.
- [8] LEITER H J. RIT-22 ion propulsion system: 5 000 h endurance test results and life prediction[C]//AIAA/ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2015.
- [9] KILLINGER R, KUKIES R, NOTARANTONIO A, et al. Artemis: ion propulsion – satellite interactions[C]// 41st AIAA/ ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2005.
- [10] HAYAKAWA Y, KITAMURA S, YOSHIDA H, et al. Endurance test of a 35 cm xenon ion thruster[C]//37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2013.
- [11] OZAKI T. In orbit operation of 20 mN class xenon ion engine for ETS-VIII[R]. IEPC-2007-084, 2007.
- [12] 张天平. 兰州空间技术物理研究所电推进新进展[J]. 火箭 推进,2015,41(2):7-12.
- [13]张天平.离子电推进技术[M].上海:科学出版社,2020.
- [14] DESCOEUDRES A, DJURABEKOVA F, NORDLUND K. DC breakdown experiments with cobalt electrodes[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(3):33303.
- [15] GOEBEL D M. Breakdown characteristics and conditioning of carbon and refractory metal surfaces[C]//Invited plenary talk at the IEEE High Voltage Workshop, San Francisco CA,

2004.

- [16] MARTINEZ R A. Electric field breakdown characteristics of carbon-based ion optics[R]. IEPC-2005-284, 2005.
- [17] MARTINEZ R A. Electric field breakdown properties of materials used in ion optics systems[R]. AIAA 2006–5004, 2006.
- [18]张雪儿,张天平,李得天.基于QMU原理的离子推力器产品性能设计及验证方法[J].火箭推进,2020,46(5):76-82.
- [19] SCHWIRZKE F R . Vacuum breakdown on metal surfaces[J].
 IEEE Transactions on Plasma Science, 1991, 19(5): 690–696.
- [20] CARR C G. Space charge-limited emission studies using Coulomb's law[D]. Naval Postgraduate School, 2004.
- [21] NICHOLAS J. Determination of breakdown voltage in gaseous and cryogenic propellants[R]. AIAA 2007–5440, 2007.
- [22] PEJOVIC M M. Electrical breakdown in low pressure gases[J]. Journal of Physics D (Applied Physics), 2002, 35(10): 91–103.
- [23] TODOROVI R , VUJISI M , KOVAEVI D , et al. Boundary area between gas and vacuum breakdown mechanism[J]. Vacuum, 2012, 86(12):1800–1809.
- [24] SILI E , CAMBRONNE J P , KOLIATENE F . Temperature dependence of electrical breakdown mechanism on the left of the Paschen minimum[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 3173–3179.
- [25] OSMOKROVIC P. Mechanism of electrical breakdown of gases at very low pressure and interelectrode gap values[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1993, 21(6): 645– 653.
- [26] DIONNE M. Optimized carbon nanotube array cathodes for thermo-field emission in plasmas: a theoretical model and an experimental verification[D]. Department of Chemical Engineering, McGill University, Canada, 2010.
- [27] ANDERS A. Breakdown of the high-voltage sheath in metal plasma immersion ion implantation[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(1):28-30.
- [28] BATRAKOV A V . A simple criterion of the vacuum breakdown threshold[C]//International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum IEEE, 2016.
- [29] PÉREZ A T. Charge and force on a conducting sphere between two parallel electrodes[J]. Journal of Electrostatics, 2002, 56 (2):199–217.
- [30] ZHANG Y Y, JIN L. Micro-particle impact phenomena on contact surface under different applied voltages in vacuum

interrupters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3771–3778.

- [31] ZHANG Y, XU X, JIN L, et al. Influence of microscopic electric field enhancement on microparticle impact phenomena based on fractal modeling[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(9):2588–2595.
- [32] MILLER H C. Flashover of insulators in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1993, 28(4): 512–527.
- [33] MILLER H C. Flashover of insulators in vacuum: the last twenty years[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22 (6):3641–3657.
- [34] PILLAI A S, HACKAM R. Surface flashover of solid insulators in atmospheric air and in vacuum[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58 (1): 146–153.
- [35] HARRIS J R , CAPORASO G J , BLACKFIELD D , et al. Displacement current and surface flashover[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(12):765–59.
- [36] BLACK T P. Plasma- induced dielectric breakdown of anodized aluminum surfaces[R]. AIAA 2006–871, 2006.
- [37] CHOI D H. Numerical modeling of space charge dynamics and electrical breakdown in solid dielectrics[D]. The Pennsylvania State University, 2013.
- [38] TODOROVIR, VUJISIM, KOVAEVID, et al. Boundary area between gas and vacuum breakdown mechanism[J]. Vacuum, 2012, 86(12); 1800–1809.
- [39] OSMOKROVIĆ P, MARIĆ R, STANKOVIĆ R, et al. Validity of the space-time enlargement law for vacuum breakdown[J]. Vacuum, 2010, 85(2):221–230.
- [40] BEILIS I I. The vacuum arc cathode spot and plasma jet: physical model and mathematical description[J]. Contrib Plasma Phys, 2003, 43 (3/4): 224 - 236.
- [41] BETTINI P, PILAN N, SPECOGNA R. A novel tool for breakdown probability predictions on multi-electrode multi-voltage systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50 (2):93–96.
- [42] HE J, GORUR R S. A probabilistic model for insulator flashover under contaminated conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1):555– 563.

- [43] OSMOKROVIC P , VUJISIC M , CVETIC J , et al. Stochastic nature of electrical breakdown in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(4): 803–812.
- [44] TANAKA Y, NAKAGAWA T, UESUGI Y, et al. A numerical model on dynamic behavior of vapor from the electrode in low- pressure arcs using moving particle method[C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), 2017.
- [45] RADJENOVIC R M , LEE J K , IZA F , et al. Particle-in-cell simulation of gas breakdown in microgaps[J]. Journal of Physics D: Applied Physics , 2005 , 38(6):950.
- [46] HIROSE H. More accurate breakdown voltage estimation for the new step-up test method in the Weibull mode[J]l. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11 (3):418-423.
- [47] LORENZI A D, PILAN N, PESCE A, et al. Validation progresses of the voltage holding prediction model at the high voltage Padova test facility HVPTF[C]// International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, IEEE, 2012.
- [48] ZHANG G J , ZHAO W B , ZHENG N , et al. Investigation on novel characterization parameters of surface flashover phenomena in vacuum[C]// International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2008.
- [49] MARTINEZ R A, WILLIAMS J D. Electric field breakdown characteristics of molybdenum and carbon-based electrodes under conditions where ions are being extracted[C]//International Power Modulator Symposium, IEEE, 2006:28–32.
- [50] CHOULKOV V V. Effect of electrode surface roughness on electrical breakdown in high voltage apparatus[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1):98-103.
- [51] WETZER J M. Vacuum insulator flashover mechanisms, diagnostics and design implications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(4): 349–357.
- [52] MARTINEZ R A. Electric field breakdown properties of ion thruster optics[D]. Discover the World's Research, 2007.
- [53] 张天平,张雪儿,蒲彦旭.离子电推进在轨故障统计与分 析研究[J].真空与低温,2019,25(4):215-221.