

# 空心阴极耦合放电的寿命损耗机理研究综述

赵志伟<sup>1</sup>, 张天平<sup>1,2</sup>, 冉文亮<sup>1</sup>, 李璇<sup>1</sup>

(1. 兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃省空间电推进技术重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要** 空心阴极和离子推力器或霍尔推力器的耦合放电与其和平板阳极的独立放电有明显差异, 主要表现为工作特性不同和寿命大幅缩短等。基于空心阴极的设计寿命与其在推力器中实际寿命显著不同的事实, 归纳分析了空心阴极在推力器中寿命缩短的主要原因, 总结了推力器中电场、磁场、背景中性气体密度等因素对空心阴极寿命的影响机理研究现状, 并提出需要进一步深化的主要研究内容。

**关键词** 空心阴极; 耦合放电; 离子推力器; 霍尔推力器; 等离子体

**中图分类号** V439 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)01-0001-11

## Review on the life loss mechanism of hollow cathode coupling discharge

ZHAO Zhiwei<sup>1</sup>, ZHANG Tianping<sup>1,2</sup>, RAN Wenliang<sup>1</sup>, LI Xuan<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Space Electric Propulsion Technology of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The coupling discharge of hollow cathode in ion thruster and hall thruster is significantly different from its independent discharge with flat electrode, mainly manifested in different working characteristics and greatly shortened service life. Based on the fact that the design life of hollow cathode is significantly different from its actual life in thruster, the main reasons for the shortening of the life of hollow cathode in thruster were analyzed, the influence of electric field, magnetic field and background neutral gas density on the life of hollow cathode was summarized, and the main research contents that need to be further deepened were put forward.

**Key words** hollow cathode; coupling discharge; ion thruster; hall thruster; plasma

## 0 引言

空心阴极是离子推力器和霍尔推力器中不可或缺的部位, 二者依靠空心阴极发射电子进行点火

启动、维持放电和中和离子束流<sup>[1]</sup>。在推力器长期工作过程中, 空心阴极的加热器、发射体、触持极、节流孔等功能结构件会逐渐损耗<sup>[2-5]</sup>, 当这些损耗达到相应限度阈值时, 就会使空心阴极失去发射额

收稿日期: 2022-02-24; 修回日期: 2022-03-14

基金项目: 甘肃省科技计划(18JR3RA412)

作者简介: 赵志伟(1995—), 男, 硕士, 研究领域为空间电推进技术。

定电子的能力从而失效,相应地,推力器也会随之失效。许多实验研究和工程应用表明,空心阴极在和推力器耦合放电的过程中存在寿命损耗速度过快的问题<sup>[6-9]</sup>,这与单独实验时空心阴极和平板电极之间的放电有较为明显的差异。为便于叙述与区别,本文将空心阴极与平板阳极之间的放电称为独立放电,将空心阴极在离子推力器或霍尔推力器中的放电称为耦合放电。

美国基于六硼化镧发射体研制的空心阴极,其设计寿命已达到十万小时并且通过了独立放电寿命实验<sup>[10]</sup>。但加州理工大学在对 30 cm 离子推力器进行长时间耦合放电实验时,发现 2 万小时左右触持极就发生了严重的损耗,3 万小时触持极顶被完全侵蚀,无法继续工作<sup>[11]</sup>。国内在对 80 mm 霍尔推力器进行耦合放电实验时,发现空心阴极的触持极损耗速度明显加快,耦合放电寿命大约只有独立放电寿命的 27%<sup>[12]</sup>。现阶段,当由空心阴极失效决定的推力器寿命无法满足航天任务的要求时,多采用安装多台推力器或在一台推力器中安装多个阴极的方式来延长寿命,如密歇根大学研制的能够安装 3 个阴极的格栅式离子推力器<sup>[13]</sup>,国内外的霍尔推力器也大多配备 2 个空心阴极<sup>[14]</sup>。本文基于空心阴极独立放电与耦合放电之间的差异,梳理了空心阴极在推力器中耦合放电加速损耗的现象和机理,对不同因素在空心阴极寿命损耗中产生的作用及其影响方式进行了分析和综述,并根据已有机理解释这一问题的局限性提出了后续研究的构想。

## 1 空心阴极放电损耗现象

空心阴极的失效形式包括:加热器失效、发射体失效、结构件失效等<sup>[15]</sup>。其中加热器只在空心阴极点火前的准备阶段工作,并且由于其在空心阴极中的位置,一般不会受到工质流率、放电电流、磁场等因素的影响,因此它的失效与这些条件没有明显关系。而发射体、节流孔、触持极等功能结构部件受空心阴极的放电条件影响较为明显。因此,本文着重讨论空心阴极的这些部件在独立放电与耦合放电中损耗现象和机理的区别。

无论是在独立放电还是在耦合放电模式下,随着阴极工作时长的积累,这些结构件都会产生损耗,具体表现为:①节流孔(阴极孔)磨损,孔径逐渐扩大,导致管内压力下降,点火越来越困难,直到彻

底无法点火,同时节流孔和触持极小孔的扩大,会使离子轻易地进入管内产生溅射腐蚀;②触持极磨损,触持极小孔扩大,触持极顶断裂或脱落,无法引出电子;③触持极管腐蚀,导致发生形变,严重时可能造成脱落或短路。空心阴极各结构及其位置如图 1 所示,以上所提到的情况中任何一个的发生都会导致空心阴极失效,而耦合放电无疑会加速这一过程。在耦合放电中,大部分的空心阴极寿命终结,都是因为发生了以上类型的结构件失效。

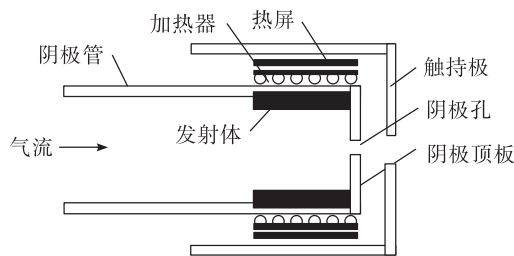


图 1 空心阴极结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hollow cathode structure

## 2 离子推力器中的主阴极受损机理

离子推力器由空心阴极、栅极以及一个相对封闭的放电室组成,其中主阴极与中和阴极的位置和作用有所不同,其工作环境和特性也有不小的差异,目前暂未有人对中和阴极的寿命损耗问题进行研究,由于缺乏相关数据的支撑,此处只讨论主阴极的寿命损耗机理。在离子推力器中,工质分别通过主阴极和阳极分配器进入放电室,放电室内电离产生的电子最终撞击在阳极上,离子经过栅极加速喷出产生推力。理想状态下,放电室电压一般为 28 V,低于材料的溅射阈值(30 V),而采用氙工质的离子推力器放电室阳极电压普遍高于这个值<sup>[16]</sup>。在与离子推力器耦合放电时,空心阴极结构件的损耗主要来自于放电室内的离子溅射,离子的能量和通量越大,造成的溅射腐蚀越严重。

### 2.1 离子溅射加速阴极损耗

#### 2.1.1 离子通量过高导致的损耗

过高的等离子体密度是导致空心阴极在离子推力器放电室内损耗加剧的重要原因之一<sup>[17-20]</sup>,由于离子推力器放电室的封闭性<sup>[21-22]</sup>,耦合放电中离子只能通过栅极离开放电室,尚未被引出的离子只能暂时聚集在放电室内,而独立放电中产生的等离子体暴露在整个真空仓中,在真空泵的作用下不能

大量累积,因此耦合放电时空心阴极周围的等离子体密度明显高于独立放电。同时由于触持极附近电势梯度较大,受到触持极低电位的吸引,触持极附近的一些离子向触持极加速运动,增加了撞击在触持极上的离子通量,增强了触持极和节流孔的溅射程度,甚至通过触持极小孔和节流孔进入阴极管内,轰击发射体,导致其温度异常升高。这些情况都会使阴极受到的腐蚀加剧,寿命缩短。除此以外,放电室内还存在能量远高于平均能量的高能离子,这些高能离子在空心阴极的损耗中起着重要的作用,以下进行详述。

### 2.1.2 离子能量过高导致的损耗

高能离子产生的主要原因之一是放电振荡<sup>[23-24]</sup>,包括电压振荡和电流振荡,耦合放电中这种振荡明显大于独立放电。现有的一些研究显示,这种放电振荡的剧烈程度与阴极-阳极间距以及阳极结构有显著关系。南洋理工大学针对阴极-阳极间距对空心阴极放电特性的影响进行了

实验研究,发现触持极与阳极的间距越大,阳极电压越高,同时放电振荡越明显,随着阴极-阳极间距的增加,阳极电压单调递增。当间距在20~40 mm之间时,空心阴极以点模式运行;而当间距增大至45 mm之后,空心阴极的工作模式逐渐过渡到羽流模式,如图2所示<sup>[25]</sup>。同时阳极电压大幅升高,数值接近原来的两倍,电压振荡幅度也明显增大。点模式下,放电电流在4 A和10 A时的振荡幅度分别为0%和9%;而当工作模式过渡为羽流模式时,4 A和10 A下的振荡幅度分别增大到12%和15%,如图3所示<sup>[25]</sup>。大幅度的振荡能够显著增强离子能量,提高离子对触持极等的溅射腐蚀强度,由此可知,在空心阴极结构件的损耗中,阴极-阳极间距起着重要作用。在间距的双向调节过程中,点模式和羽流模式对应的间距界限有一定的滞后性,但在不同的放电电流下没有明显差别,说明触持极到阳极距离对放电特性的影响与放电电流无关,至于是否受到其他因素的干扰尚不清楚。

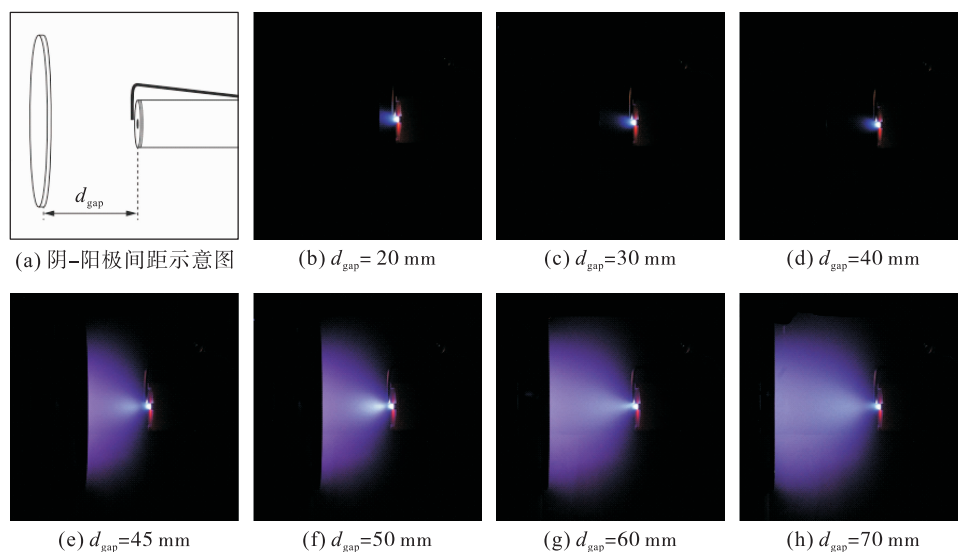


图2 不同阴极-阳极间距下的阴极羽流形貌

Fig. 2 Cathode plume morphology under different cathode-anode distance

北京理工大学关于阳极结构对空心阴极放电特性的影响进行了研究,用于对比的2个阳极分别是:①直径20 cm、长度20 cm的环形阳极,前端面距离触持极0.5 cm;②直径15 cm的平板阳极,距离触持极7 cm,测量区域边界距离触持极0.5 cm。测量方案如图4所示<sup>[26]</sup>。结果表明,虽然环形阳极下阳

极电压略低于平板阳极,但其放电室内空间电势空间分布明显更复杂,电势振荡远高于平板阳极,如图5和图6所示<sup>[26]</sup>。在两组实验中,等离子体的最高电位分别出现在轴线上距离触持极5 cm的位置(平板阳极)以及径向上 $r = 2$  cm的位置(环形阳极),这可能与电子的运动轨迹有关。

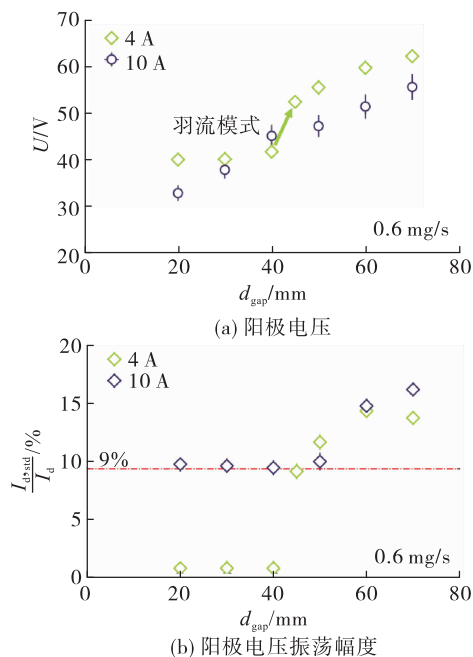


图 3 阴极-阳极间距对阳极电压及其振荡幅度的影响

Fig. 3 Influence of cathode-anode distance on anode voltage and voltage oscillation amplitude

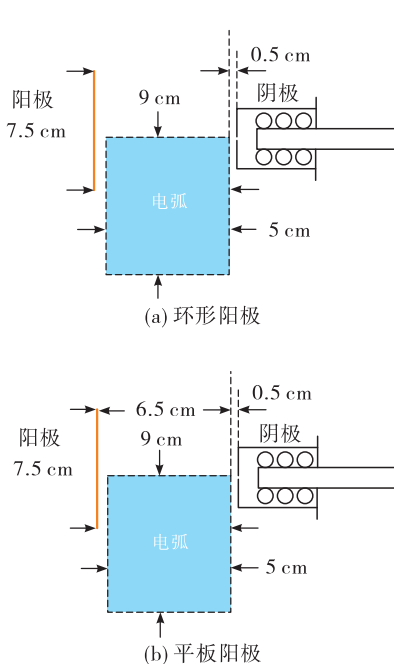


图 4 两种阳极结构下测量区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement area under two anode structures

以上研究表明,阳极结构以及触持极到阳极之间的距离是影响空心阴极放电特性的重要因素之一。较小的间距和简单的阳极结构不利于产生复

杂的电场,其电场分布也不容易发生较大的变化,规则且稳定的电场有利于维持较低的阳极电压和较小的电压振荡。而过大的间距和复杂的阳极结构容易产生复杂且多变的电场分布,这样的电场更容易导致大幅度的电压振荡。值得注意的是,环形电极以及离子推力器的阳极,其各部分到触持极的间距是不同的,而阳极整体又要保持在同一个电位,这很容易引起放电振荡,振荡导致羽流中离子能量超过阳极电压,造成的侵蚀率高于独立放电<sup>[27-28]</sup>。

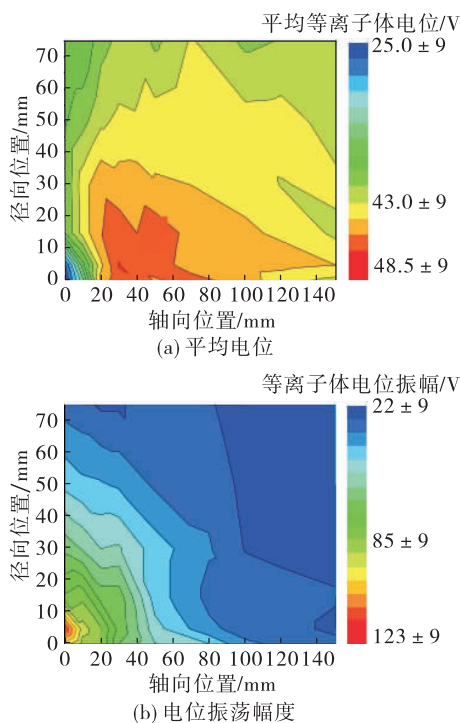


图 5 环形阳极下的平均电位和振幅

Fig. 5 Average plasma potential and amplitude of plasma potential under annular anode

另一些研究表明,对空心阴极造成溅射腐蚀的高能离子的产生与加速和离子声波有关<sup>[29-32]</sup>。当初始电子的马赫数达到一定值时,就会产生大振幅的离子声波,并可以观察到大量回流的高能离子<sup>[33]</sup>。这一理论指出,等离子体中的电势振荡以及产生高能离子的多少,强烈依赖于电子的能量。日本国家航空航天实验室测量了 14 cm 离子推力器放电室内多个位置的电子能量分布函数,发现轴线附近的点,电子能量普遍具有 2 个峰值,其中距离触持极较远的点,大部分电子能量只有 12 eV 左右,而轴线上距离触持极较远的以及远离轴线的电子,其能



量峰值普遍超过 30 eV,同时整个放电室内的电子能量不符合麦克斯韦分布<sup>[34]</sup>。高能电子频繁碰撞离子,对离子进行加热,并影响局部的电场分布,造成等离子体的异常电阻率以及空间电势振荡<sup>[35]</sup>。电子能量不符合麦克斯韦分布的原因还不清楚,但在异常的电子能量分布前提下,对空心阴极损耗的数值模拟结果与耦合放电实际结果具有较好的一致性,说明电子能量在空心阴极损耗中的确起着重要作用。

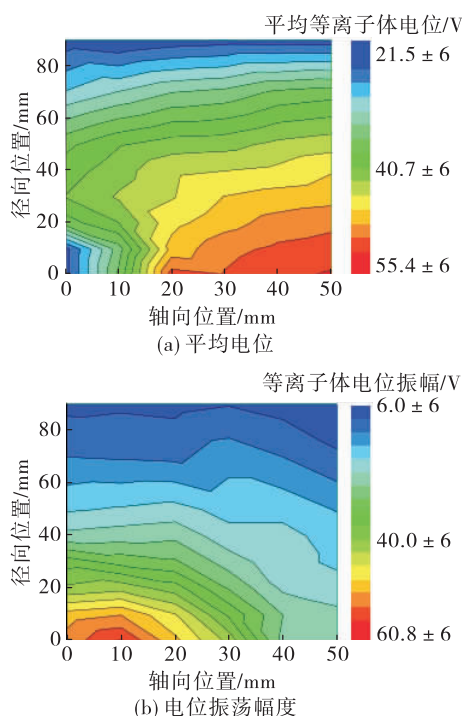


图6 平板阳极下的平均电位和振幅

Fig. 6 Average plasma potential and amplitude of plasma potential under plate anode

## 2.2 磁场和中性气体缓解阴极损耗

### 2.2.1 磁场

空心阴极独立放电时没有外加磁场,而与离子推力器耦合放电中,一般会施加磁场以约束放电室内的等离子体。北京航空航天大学测量了不同磁场强度下空心阴极触持极的腐蚀位置分布及强度,各组的实验条件如表1所示<sup>[36]</sup>,实验结果如图7所示<sup>[36]</sup>。当外加磁场强度为0时,空心阴极的腐蚀主要集中在一点上,程度较重。随着磁场强度增加,空心阴极的腐蚀面积扩大,程度减轻。原因是磁场限制了等离子体尤其是电子的径向运动,那么碰撞

产生的速度分量便集中在轴向上,使得原本集中于某一点的溅射变得分散了,要破坏空心阴极结构,需要更强的溅射总能量。因此,磁场的存在,一定程度上缓解了空心阴极的损耗,延长了寿命。

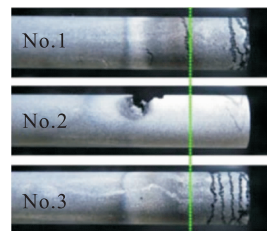


图7 不同磁场强度下阴极腐蚀情况

Fig. 7 Cathodic corrosion under different magnetic field intensity

### 2.2.2 中性气体

同时在该实验中,实验人员还研究了阳极流率对阴极的影响,实验数据及结果如表1和图8所示<sup>[36]</sup>。在放电电流、磁场强度、阴极流率等其他条件一致的情况下,阳极流率越大,空心阴极的腐蚀程度越轻。这是因为从阳极分配器流入的工质气体距离触持极较近,这些中性气体原子在受到电子和离子的碰撞时,会降低电子和离子的温度并阻碍其运动,对缓解放电振荡和减少离子对触持极等的溅射有一定作用。

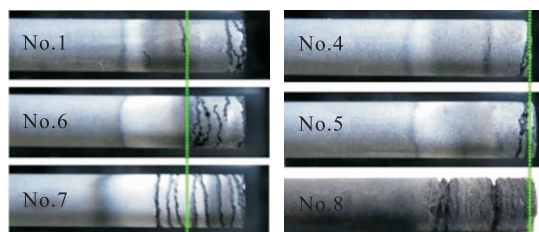


图8 不同阳极流率下阴极腐蚀情况

Fig. 8 Cathodic corrosion under different anode flow rates

哈尔滨工业大学研究发现,背景气体压力对空心阴极的放电稳定性有一定程度的影响,背景气体压力越高,空心阴极放电越稳定,虽然羽流范围有明显扩大,但振荡反而变小。同时,平均离子能量和离子能量峰值均随背压的增大而减小,如图9~图11所示<sup>[37]</sup>。同理,背景中性气体分子在受到电子和离子碰撞的同时,会使羽流中电子和离子能量降低,缓解了振荡和触持极等的损耗。

表 1 阴极腐蚀点位置实验的推力器操作条件

Tab. 1 Thruster operation conditions for the evaluation of cathode erosion spot location

编号	$S_{M-c}/\text{mm}$	$B_a/\text{mT}$	$m_a/(\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$	$m_c/(\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_d/\text{V}$	$I_d/\text{A}$
1	6.1	68	16.8	4.2	27.0	150
2	6.1	0	16.8	4.2	14.2	150
3	6.1	102	16.8	4.2	33.6	150
4	0.0	68	16.8	4.2	28.9	150
5	0.0	68	16.8	4.2	28.1	150
6	7.6	68	25.2	6.3	27.1	150
7	7.6	68	4.2	16.8	30.2	150
8	0.0	68	0.0	4.2	—	150

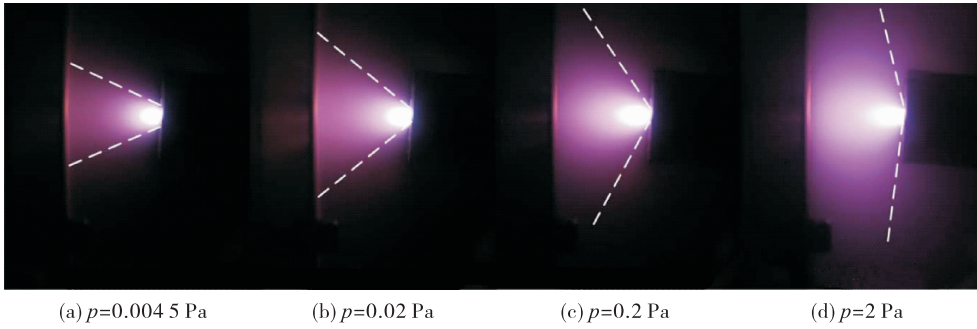


图 9 不同背压下阴极羽流形貌

Fig. 9 Cathode plume morphology under different back pressures

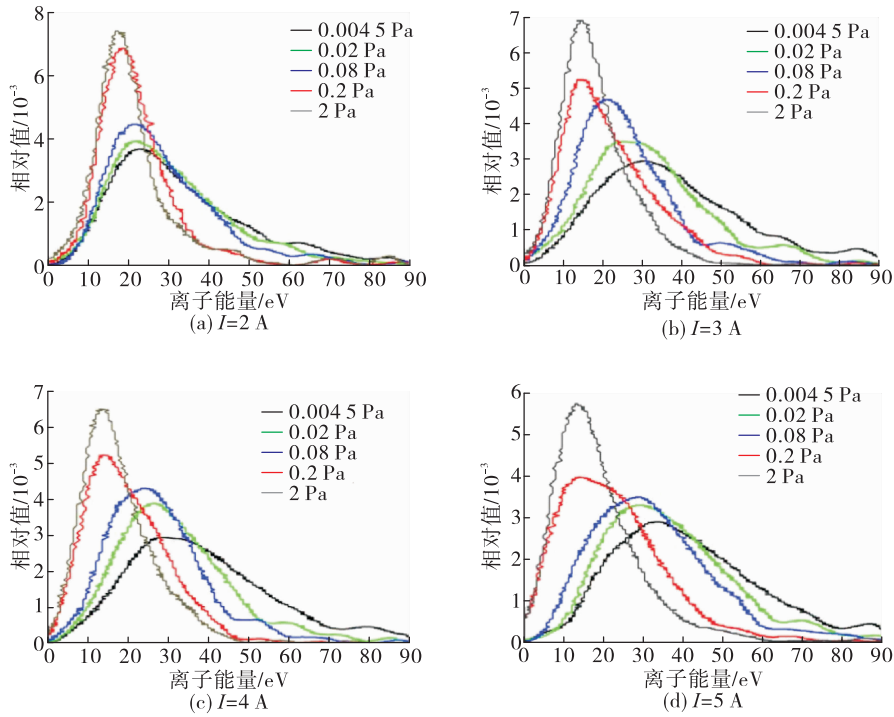


图 10 不同背压和电流下的离子能量分布

Fig. 10 Ion energy distribution under different back pressure and current

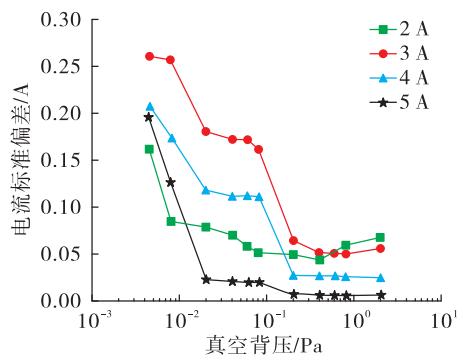


图11 电流标准差随背压的变化

Fig. 11 Variation of current standard deviation with back pressure

### 3 霍尔推力器中的阴极受损机理

霍尔推力器的工作原理与离子推力器有所不同,在霍尔推力器中,工质气体在环形通道中与电子碰撞发生电离,离子在电场作用下被加速,产生推力<sup>[38-39]</sup>。根据空心阴极安装位置的不同,霍尔推力器中的阴极安装方式分为中置与偏置两种,当前大多数的霍尔推力器采用阴极偏置的安装方式。在偏置阴极霍尔推力器中,决定空心阴极寿命损耗速度的则主要是羽流中的离子能量和通量<sup>[40]</sup>。

#### 3.1 离子溅射加速阴极损耗

##### 3.1.1 离子通量过高导致的损耗

虽然没有离子推力器那样封闭的放电室,但由于霍尔推力器的羽流发散角较大,偏置阴极的触持极往往处在霍尔推力器羽流区域内。因此阴极周围的等离子体密度同样很高,羽流中的离子受到阳极加速,已经具有较高的能量。当其运动到触持极附近时,在局部电场的作用下,能量进一步提高,造成的腐蚀相当严重。

##### 3.1.2 离子能量过高导致的损耗

霍尔推力器的阳极为一环形通道,与离子推力器的阳极相比,结构复杂程度相对较低。但是在偏置阴极霍尔推力器中,触持极与阳极各部分的距离也有一定差异,导致触持极到阳极之间的电场为非对称分布。因此放电振荡在霍尔推力器中同样存在。

由阳极结构以及阴极-阳极间距所导致的霍尔推力器放电振荡,其现象和机理与离子推力器类似,此处不再赘述。北京理工大学研究发现,空心阴极与霍尔推力器耦合放电时有明显的电流振荡,

且振荡幅度随放电电流的增加而迅速增大。而在空心阴极独立放电中虽然也有微小的振荡,但振幅不大且基本不受放电电流的影响<sup>[41]</sup>。加州理工学院通过实验研究,将振荡分为高频振荡和低频振荡两种。高频振荡的频率在200 kHz ~ 1 MHz之间,主要由离子声波引起;低频振荡频率为50 ~ 200 kHz,振幅较大<sup>[42]</sup>。当放电电流、阴极流率或者磁场发生改变时,振荡也随之改变,其振幅可能增大,并导致阴极放电模式从点模式逐渐向羽流模式转变。图12为放电电流振荡幅度随阴极流率的变化情况<sup>[42]</sup>。一般来说,较大的电流使得阳极电压更低,但所需的流率相应较大,在给定的放电电流下,流率越大等离子体密度也越大,平均离子能量和阳极电压更低,更容易维持稳定的放电<sup>[29]</sup>。而最恶劣的情况一般发生在放电电流较大而阴极流率较小的情况下,此时由于离子数量较少因而导致平均离子能量增强。进一步地,在低频振荡中,特别是70 ~ 90 kHz的振荡在阴极附近达到峰值,这种振荡是由电势梯度驱动的<sup>[43]</sup>。这表明结构复杂的阳极对耦合放电的电场分布和放电稳定性的确会产生不利影响。

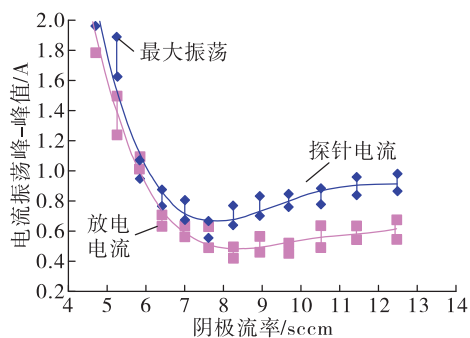


图12 不同阴极流率下电流振荡幅度

Fig. 12 Current oscillation amplitude under different cathode flow rates

密歇根大学研究发现,在中置阴极霍尔推力器羽流中存在非经典的电子输运,这会导致空心阴极与霍尔推力器耦合放电的不稳定性增强。羽流中同时存在离子声波(500 ~ 1 250 kHz)与反漂移波(50 ~ 400 kHz)<sup>[44]</sup>。离子声波沿纵向传播,其本质是由沿磁场方向运动的电子漂移传播的,而反漂移波本质上是旋转的,又称为旋转波。离子声波在平行于外加磁场的方向上使有效碰撞频率增强,超过

经典碰撞频率两个数量级。反漂移波促进了一个依赖于电子漂移方向各向异性碰撞频率,径向有效碰撞频率比经典碰撞频率高出 3 个数量级。总的来说,离子声波导致电子对离子的加热以及更陡峭的电势梯度,而低频的大幅度振荡与瞬态电势结构相关。密歇根大学的研究表明,非经典的离子加速的确发生在空心阴极附近。因此,离子声波的存在是导致空心阴极耦合放电振荡与高能离子产生的重要原因之一。

### 3.2 磁场缓解阴极损耗

在哈尔滨工业大学研制的磁聚焦霍尔推力器中,羽流区施加了轴向磁场,限制了等离子体的径向运动,使得霍尔推力器的羽流发散角大幅度减小,因而在大角度上的离子通量显著降低。这种发散角的收敛能够在轴向上保持较长的一段距离,当羽流发散角足够小,使得触持极处于羽流区之外时,撞击在触持极上的离子通量也会降低,有效地减弱了羽流中的离子对空心阴极触持极的溅射程度<sup>[45]</sup>。日本航空航天勘探局分别测量了有磁场和无磁场时空心阴极的点火和持续放电特性,图 13 为触持极电压振荡、电流振荡、平均电压、点火电压分别在有无磁场情况下的对比<sup>[46]</sup>。由于局部和瞬态的电势梯度对等离子体的加热受到磁场的影响,对电子的影响尤其明显。电离不稳定性强烈依赖于电子温度,而磁场的存在显著缩小了电子的拉莫尔回旋半径,使得小范围内电子与其他离子的碰撞频率大幅度增加。因而被电场加热的电子在磁场的作用下频繁碰撞从而失去能量,温度降低,这一机制有效降低了电离不稳定性。

在空心阴极管内,来自发射体的原初电子电离中性气体,产生的电子和离子均通过阴极尾部的节流孔进入放电室。部分离子由于具有较大的径向速度分量,会在向下游运动的过程中无法通过节流孔而撞击在节流孔板上产生溅射腐蚀,导致节流孔径扩大,逐渐难以维持管内气压而无法点火<sup>[1,15]</sup>。同理,部分电子通过节流孔后会撞击在触持极内壁上,造成电流损失<sup>[47]</sup>,这是引起空心阴极放电振荡的另一个原因。虽然使用六硼化镧材料作为触持极进行电流补偿能够缓解振荡<sup>[48]</sup>,但这种思路目前还处于实验阶段,且更换材料容易带来其他方面的问题。

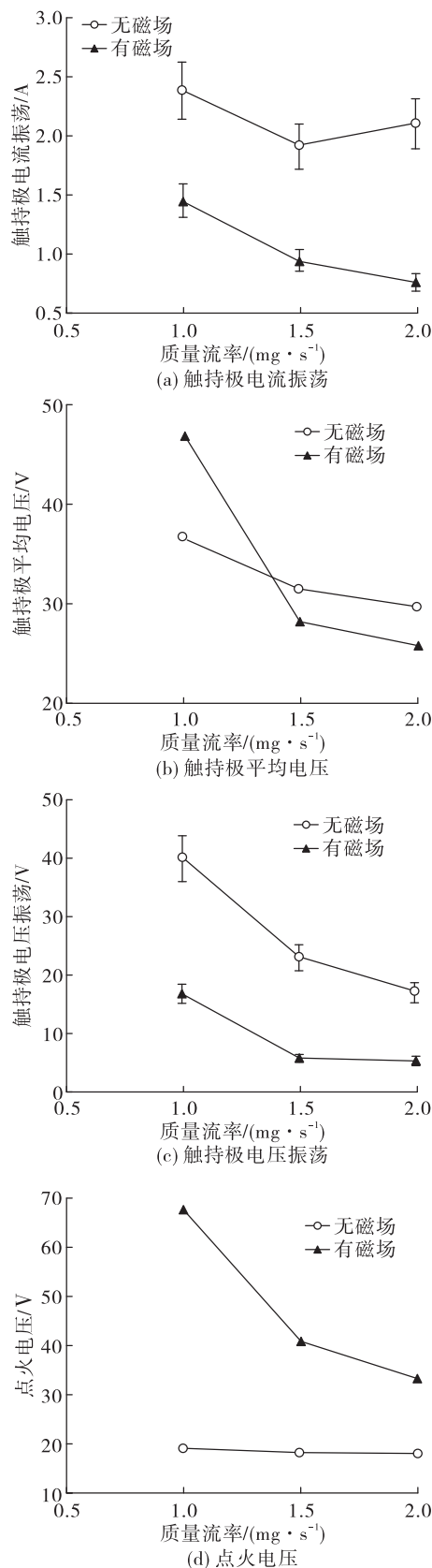


图 13 磁场对电流和电压特性的影响

Fig. 13 Influence of magnetic field on current and voltage characteristics



而磁场能够减小离子对节流孔的撞击以及电子的损失:平行于轴线方向的磁场能够抑制等离子体的径向运动,这一作用针对电子尤其明显,当电子的径向运动被抑制,那么撞击在触持极上的电子数量就会大大降低,电流损失也随之降低,有利于缓解放电振荡,如图14所示<sup>[49]</sup>。

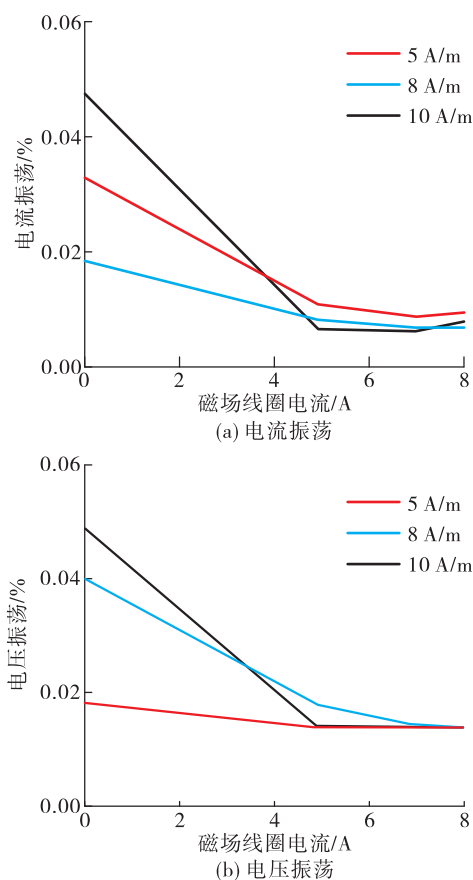


图14 磁场强度对电流和电压振荡幅度的影响

Fig. 14 Influence of magnetic field intensity on current and voltage oscillation amplitude

当磁场足够强时,离子的径向运动也被抑制,因而离子能够更多地通过节流孔而不是撞击在节流孔板上,这样能够有效地保护空心阴极的结构件,这一机制在离子推力器中同样存在。俄罗斯高流电子研究所的相关研究也表明,磁场具有减小电子束直径的作用,但其对电子束直径的影响是非单调的,当磁场强度特别大时,电子束直径反而会急剧增加<sup>[50]</sup>。同时,当电子束直径小于节流孔和触持极孔的孔径时,进一步增强磁场是非必要的。因此,针对特定规格的空心阴极,利用磁场缓解损耗

时需要根据实际情况灵活处理,此外还要综合考虑对磁场对推力器性能参数等其他方面的影响。

## 4 结论

### 4.1 当前研究结论

综合离子推力器与霍尔推力器目前的研究成果,可以得出以下结论。

1)空心阴极与离子推力器和霍尔推力器耦合放电过程中,其工作特性、寿命及所处的等离子体环境的确与独立放电存在较大的差异。

2)空心阴极在与离子推力器和霍尔推力器耦合放电时,造成其寿命缩短的主要原因是大量高能离子对结构件的腐蚀破坏。

3)高能离子的产生来源于耦合放电振荡,放电振荡在空心阴极与离子推力器和霍尔推力器耦合放电过程中均存在,振荡可能由复杂的阳极结构及局部瞬态电场、陡峭的电势梯度、不正确的放电电流、阳极流率及离子声波所导致。

4)磁场能够对空心阴极起到保护作用:①在离子推力器中,轴向磁场使得阴极表面原本集中的腐蚀变得分散,程度减轻;②在磁聚焦霍尔推力器中,磁场大幅度减小了羽流发散角,当空心阴极的触持极不再处于羽流范围内时,轰击触持极的离子通量显著减小;③在空心阴极内部,磁场会限制等离子体的径向运动,不仅可以减轻节流孔板受到的离子溅射,还能够减小触持极上的电流损失,抑制放电振荡。

5)中性气体对空心阴极的腐蚀有缓解作用,不管是阳极的工质气体,还是其他背景气体,都能够吸收高能离子的能量,保护阴极。但在工程应用中,空间背景压力很低,阳极流率也受到多方面的限制,实际上能产生的效果并不明显。

### 4.2 后续研究计划

耦合放电振荡高度依赖于电子能量,并且电子能量一般不符合麦克斯韦分布。不同频率的振荡,其特性有明显区别,产生振荡的机理尚不清楚,放电室和羽流中等离子体参数目前也没有良好的模型,已有的理论和假设无法很好地解释这些问题。未来还需要进一步的研究,全面总结空心阴极寿命损耗加速的现象和机理。

1)测量空心阴极独立放电与耦合放电时溅射

触持极的离子能量分布函数,或进行独立放电与耦合放电的寿命实验并进行对比,明确对于特定的空心阴极及推力器型号,耦合放电对寿命损耗的加速系数。

2)测量独立放电与耦合放电两种情况下放电室内或羽流中的等离子体特性,明确等离子体中粒子温度、密度、电势等参数的空间分布情况,分析其与寿命损耗速度之间的联系。

## 参考文献

- [1] 于达仁,刘辉,丁永杰. 空间电推进原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.
- [2] 李文博,胡俊锋,孙昊,等. 电推进空心阴极热子的寿命评估研究[J]. 推进技术,2017,38(9):2146-2151.
- [3] COLETTI M, GABRIEL S B. A model for Barium oxide depletion from hollow cathode inserts[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(1):58-66.
- [4] 杨威,张天平,冯杰,等. 石墨触持极空心阴极性能实验研究[J]. 真空与低温,2017,23(2):87-91.
- [5] RUDWAN I, WALLACE N, COLETTI M, et al. Emitter depletion measurement and modeling in the T5&T6 Kaufman-type ion thrusters[R]. IEPC2007-256.
- [6] SENGUPTA A. Destructive physical analysis of hollow cathodes from the Deep Space 1 Flight spare ion engine 30 000 hr life test[C]//29th International Electric Propulsion Conference. Princeton, NJ: [s. n.], 2005.
- [7] POLK J, KAKUDA R, ANDERSON J, et al. Performance of the NSTAR ion propulsion system on the Deep Space One mission[C]//39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2001.
- [8] 张伟文,张天平. 空间电推进的技术发展及应用[J]. 国际太空,2015(3):1-8.
- [9] SARVER-VERHEY T. Continuing life test of a xenon hollow cathode for a space plasma contactor[C]//30th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 1994.
- [10] VAN NOORD J L, KAMHAWI H, MCEWEN H K. Characterization of a high current, long life hollow cathode[R]. NASA/TM-2006-214095.
- [11] MIKELLIDES I G, KATZ I, GOEBEL D M, et al. Wear mechanisms in electron sources for ion propulsion, II: Discharge hollow cathode[J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(4):866-879.
- [12] MENG T H. Accelerated erosion of keeper electrode during coupling discharge between Hall thruster and hollow cathode[J]. Vacuum, 2020, 172:109040.
- [13] ROVEY J L, GALLIMORE A D. Dormant cathode erosion in a multiple-cathode gridded ion thruster[J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(6):1361-1368.
- [14] 金广明,康亮杰. “天和”核心舱霍尔电推进子系统设计与[J]. 中国航天,2021(8):22-27.
- [15] 张天平,贾艳辉,郭宁. 离子电推进物理[M]. 北京:科学出版社,2019.
- [16] 郭宁,江豪成,高军,等. 离子发动机空心阴极失效形式分析[J]. 真空与低温,2005,11(4):239-242.
- [17] JAMESON K K, GOEBEL D M, WATKINS R M. Hollow cathode and thruster discharge chamber plasma measurements using high-speed scanning probes[R]. IEPC-2005-269.
- [18] ZIKEYEV M V, SHAGAYDA A. Probe measurements in discharge chamber of low-power ion thruster[R]. IEPC-2003-120.
- [19] KOTHNUR P S, SHIN J, RAJA L L. Experimental and numerical study of external plume characteristics in micro-hollow cathode discharges[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2):564-565.
- [20] BECATTI G, PEDRINI D, KASOJI B, et al. Plasma plume diagnostics of a LaB<sub>6</sub> hollow cathode with triple Langmuir probes[J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(8):C08009.
- [21] 赵以德,李建鹏,张天平,等. 两种会切场离子推力器对比研究[J]. 推进技术,2021,42(11):2633-2640.
- [22] 赵以德,张天平,李娟,等. 40 cm 离子推力器设计与性能测试[J]. 高电压技术,2020,46(6):2192-2199.
- [23] FARNELL C C, WILLIAMS J D, FARNELL C C. Comparison of hollow cathode discharge plasma configurations[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2011, 20(2):025006.
- [24] SEKERAK M J. Plasma oscillations and operational modes in Hall effect thrusters[D]. Detroit: University of Michigan, 2014.
- [25] POTRIVITU G C. Anode position influence on discharge modes of a LaB<sub>6</sub> cathode in diode configuration[J]. Vacuum, 2018, 151:122-132.
- [26] QIN Y. The analysis of high amplitude of potential oscillations near the hollow cathode of ion thruster[J]. Acta Astronautica, 2017, 134:265-277.
- [27] JORNS B A, MIKELLIDES I G, GOEBEL D M. Temporal

- fluctuations in a 100 A LaB<sub>6</sub> hollow cathode [R]. IEPC 2013-385.
- [28] FOSTER J E, PATTERSON M J. Downstream ion energy distributions in a hollow cathode ring cusp discharge [J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21 (1): 144-151.
- [29] DUM C T, CHODURA R, BISKAMP D. Turbulent heating and quenching of the ion sound instability [J]. Physical Review Letters, 1974, 32 (22): 1231-1234.
- [30] KUZORA I V. Dynamic polarizability of plasma and turbulent heating of light and heavy ions [J]. Physics Letters A, 2003, 315 (3/4): 248-257.
- [31] BYCHENKOV V Y. Ion-acoustic turbulence and anomalous transport [J]. Physics Reports, 1988, 164 (3): 119-215.
- [32] DUBOIS D F, PESME D. Stability of ion acoustic turbulent states [J]. Journal of Statistical Physics, 1985, 39 (5/6): 783-816.
- [33] HARA K, TREECE C. Ion kinetics and nonlinear saturation of current-driven instabilities relevant to hollow cathode plasmas [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28 (5): 055013.
- [34] HAYAKAWA Y, MIYAZAKI K, KITAMURA S. Measurements of electron energy distributions in an ion thruster [J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8 (1): 118-126.
- [35] FARSHI E, FUKUYAMA T, MATSUKUMA M, et al. Non-Maxwellian shape of electron distribution function in ion acoustic turbulence [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 29 (6): 907-910.
- [36] WU P, WANG Y B, LI Y, et al. Cathode erosion site distributions in an applied-field magneto plasma dynamic thruster [J]. Plasma Science and Technology, 2020, 22 (9): 094008.
- [37] NING Z X, CHU Y F, LIU X Y, et al. Effect of vacuum back-pressure on discharge characteristics of hollow cathode [J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21 (12): 125402.
- [38] IKEDA T. Performance characteristics of very low power cylindrical Hall thrusters for the nano-satellite "PROITERES-3" [J]. Vacuum, 2013, 88: 63-69.
- [39] 康小录, 张岩. 空间电推进技术应用现状与发展趋势 [J]. 上海航天, 2019, 36 (6): 24-34.
- [40] FISCH N J, RAITSES Y. Plasma plume of annular and cylindrical Hall thrusters [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36 (4): 1204-1205.
- [41] 谢侃, 衣晓龙, 梁福文, 等. 空心阴极与霍尔推力器放电振荡关系实验研究 [J]. 固体火箭技术, 2022, 45 (3): 484-490.
- [42] GOEBEL D, JAMESON K, KATZ I, et al. Plasma potential behavior and plume mode transitions in hollow cathode discharges [R]. IEPC2007-277.
- [43] JORNS B A, HOFER R R. Plasma oscillations in a 6 kW magnetically shielded Hall thruster [J]. Physics of Plasmas, 2014, 21 (5): 053512.
- [44] JORNS B A, CUSSON S E, BROWN Z, et al. Non-classical electron transport in the cathode plume of a Hall effect thruster [J]. Physics of Plasmas, 2020, 27 (2): 022311.
- [45] YU D R, MENG T H, NING Z X, et al. Confinement effect of cylindrical-separatrix-type magnetic field on the plume of magnetic focusing type Hall thruster [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2017, 26 (4): 04LT02.
- [46] KINEFUCHI K, CHO S, FUKATSU T, et al. Keeper ignition and discharge characteristics of hollow cathode center-mounted on Hall thruster [J]. Journal of Propulsion and Power, 2020, 37 (2): 223-230.
- [47] MENG T H, NING Z X, YU D R. Triggering of ionization oscillations in hollow cathode discharge by keeper electrode [J]. Physics of Plasmas, 2019, 26 (9): 093510.
- [48] MENG T H, NING Z X, YU D R. Reduced plume oscillation amplitude in hollow cathode discharge due to enhanced electron emission from keeper electrode [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53 (18): 18LT01.
- [49] 王福锋. 空心阴极稳态寿命限制机理及拓展方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [50] BAKEEV I Y. Influence of a longitudinal magnetic field on the parameters and characteristics of a forevacuum plasma electron source based on a hollow-cathode discharge [J]. Vacuum, 2021, 187: 110161.