

## 霍尔推力器寿命实验和计算分析

张志远<sup>1</sup>, 田 杨<sup>2</sup>, 王平阳<sup>3</sup>, 吴建军<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 北京电子工程总体研究所, 北京 100854;

3. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 为了准确高效地预估霍尔推力器寿命, 利用在真空舱内工作较短时间后的霍尔推力器结合三坐标测量仪测量其放电室陶瓷绝缘内外壁面轮廓的直径沿周向的变化情况, 以此作为输入参数结合概率密度公式获得了高效率的半经验公式法模型和计算结果。采用文献算例对模型和计算代码进行了验证, 表明改进后的模型和算法能够在霍尔推力器短时间运行的测量结果基础上较为准确地预测长时间工作后放电室壁面轮廓形状, 进而得到推力器的使用寿命。在此基础上, 针对影响 HET-40 推力器寿命的主要因素进行了考察, 获得了相关的影响规律。结果表明, 其他条件不变的情况下, 霍尔推力器的寿命与输入功率乘积近似常数, 对于本研究对象, 该常数大约为  $3.6 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{h}$ 。

**关键词:** 霍尔推力器; 寿命; 实验; 半经验公式法; 概率密度

**中图分类号:** V439.4-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 03-0016-07

## Experiment and calculation analysis of Hall thruster lifetime

ZHANG Zhi-yuan<sup>1</sup>, TIAN Yang<sup>2</sup>, WANG Ping-yang<sup>3</sup>, WU Jian-jun<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;

3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to accurately and efficiently predict the lifetime of Hall thruster, the short-duration experiment was carried out in the vacuum tank in combination with three-coordinate measuring instrument. The discharge chamber wall profile parameters were obtained after Hall thruster working for some time. The improved semi-empirical model was developed based on the probability density function and the short-duration experimental results. The reliability was examined by using the experimental conditions and results of the available literature and showed the improved

收稿日期: 2014-03-14; 修回日期: 2014-04-28

基金项目: 上海市自然科学基金(12ZR1414700)

作者简介: 张志远 (1965—), 男, 博士生, 研究领域为推进技术

model and algorithm can efficiently predict the real lifetime of Hall thruster. The effects of the main factors on the lifetime were investigated. The results showed the lifetime times the power is about a constant and it is about  $3.6 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{h}$  for HET-40 here.

**Keywords:** Hall thruster; lifetime; experiment; semi-empirical method; probability density

## 0 引言

霍尔推力器放电室壁面轮廓受等离子体的溅射侵蚀直接影响其运行寿命<sup>[1-2]</sup>, 当埋置于绝缘陶瓷内的磁极由于溅射而裸露出来时, 其寿命即宣告终止。实验是考察霍尔推力器寿命的重要方法之一, 通常采用多层涂层法<sup>[3-4]</sup>、激光测量法<sup>[5-6]</sup>、光谱法等<sup>[7-8]</sup>, 并分为长寿命实验和短寿命实验, 前者可以准确获知某台推力器的运行寿命, 如文献[9]列表给出了多款霍尔推力器长寿命实验的结果, 缺点是实验周期一般都在几千甚至数万小时; 短寿命实验周期短、花费少, 但能得到的信息有限, 如 Peterson 等曾用装有 5 种不同的氮化硼绝缘环的 NASA-120MSPT 做实验, 200 h 实验结果表明, 5 种材料的溅射特性有很大差异<sup>[9]</sup>。Solodukhim 等研究了 D-80 在不同工况下的 100 h 寿命实验, 结果表明 SPT 放电室绝缘层溅射侵蚀速率与点火状态有很大关系, 并和运行电压之间有一个非线性的关系<sup>[10]</sup>。

鉴于寿命实验时间长耗资大, 于是人们开始将目光投向非直接测量壁面轮廓的渠道, 即通过建立合适的数学物理模型计算或通过较易获取的物理量反推, 直接或间接得到霍尔推力器放电室轮廓随时间的变化, 进而对其寿命进行预估, 主要方法分为三类, 即简易解析模型法、半经验模型法和数值模拟方法。Manzella 采用简易解析模型法对 SPT-100 推力器进行了寿命计算<sup>[12]</sup>。该方法的优点在于计算速度较快, 物理概念清晰; 于达仁采用该方法对 SPT 运行参数与壁面溅射侵蚀的关系进行了分析, 以优化推力器设计<sup>[13]</sup>; Lovtsov 则采用半经验公式法对 KM-45 和 EM-900W 霍尔推力器寿命进行计算<sup>[14]</sup>。该方法需要短寿命实验

结果支撑, 但结果相对简易模型法更加可靠。Fife 率先将传统 PIC 方法处理离子和中性粒子结合 Fluid 方法处理电子形成混合 PIC 方法, 并针对霍尔推力器羽流开展研究<sup>[15]</sup>。之后, 很多学者在改进的基础上, 将其扩展到霍尔推力器内部电离、加速及离子与壁面之间相互作用过程的计算, 从而用于预测霍尔推力器的寿命<sup>[16-17]</sup>。

本文首先针对我国自主研发的 HET-40 进行短寿命实验测量, 将测量结果作为输入参数并结合概率密度分布函数改进文献 [14] 中的半经验公式法, 以提高计算效率。利用文献 [12] 中的长寿命实验结果进行验证。最后, 针对影响 HET-40 寿命的主要因素进行考察, 为其优化设计提供参考。

## 1 短寿命实验

### 1.1 短寿命实验系统

实验在直径 2.5 m、长 8.0 m 的真空舱内进行, 空载极限压强可达到  $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ , 推力器工作时 (氙气流量约为 2.54 mg/s) 压强为  $9.2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  左右。

HET-40 是我国自主研发的霍尔推力器型号之一, 未来预计对其进行 1 000 h 的寿命预估真空舱实验。SPT 在使用时, 由于溅射侵蚀作用导致绝缘层逐渐变薄, 当绝缘层溅射侵蚀至消失, 磁极暴露在离子流中, SPT 寿命即宣告结束。图 1 为 HET-40 在表 1 给出的基本运行参数下运行一定时间后放电通道出口的图片, 从图中可以看出推力器出口位置处的绝缘层和内部的绝缘层相比, 有明显的溅射侵蚀痕迹。采用精度为  $1.5 \times 10^{-2} \text{ mm}$  的三坐标测量仪, 针对同一周向位置, 沿加速通道内外壁面轴向方向分别测量运行前及

其运行 173 h 后壁面的溅射削蚀情况,二者相减即为溅射消蚀掉的部分。

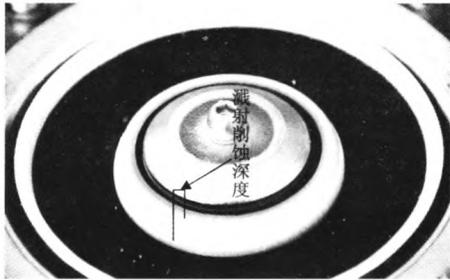


图 1 工作一定时间后 HET-40 出口壁面轮廓

Fig. 1 The exit location of HET-40 after running

表 1 HET-40 的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of HET-40

名称	外壁直径/mm	内壁直径/mm	放电电压/V	阳极质量流 量/(mg·s <sup>-1</sup> )	通道长 度/mm
数值	70	41.4	300	2.3	35

## 1.2 短寿命实验结果

短寿命实验在推力器于真空舱内运行 173 h 后暂停。将推力器从真空舱中取出放入实验数据测量装置中。测量时,由于推力器出口处绝缘层轮廓变化较为明显,在选取轴向测量点时,推力器放电室靠近出口处的壁面测量点数量要适当加密。距离出口 0~0.25 mm 范围内,每个测量点的间距为 0.01 mm; 0.25~2.00 mm 范围内,每个测量点间距为 0.05 mm; 2~7 mm 范围内,每个测量点的间距为 0.5 mm。7 mm 位置后推力器放电室绝缘层壁面轮廓基本没有变化,可以认为离子溅射还没有影响到这部分区域,测量到这个位置为止。这些测点在轴向的划分方式与实验前测量的划分一致。

运行 173 h 后, HET-40 的短寿命实验结果见图 2 和图 3, 分别表示推力器放电室内外壁面直径随轴向的变化情况。

从图中可以直观的看出推力器在经过 173 h 的短寿命实验后, 绝缘层壁面受离子流影响溅射削蚀效果明显, 且内壁面的溅射削蚀较外壁面要严重。

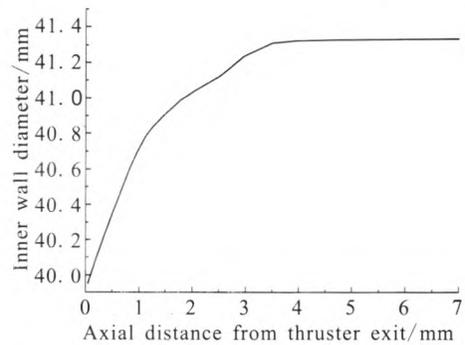


图 2 运行 173 h 后 HET-40 内壁面轮廓

Fig. 2 The inner wall of HET-40 after 173 h

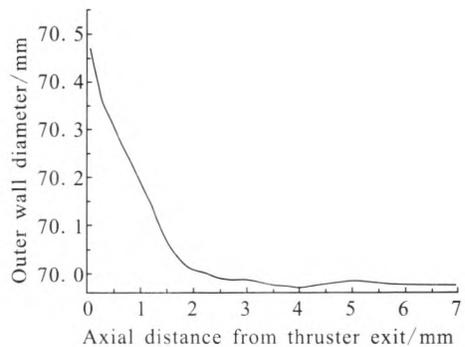


图 3 运行 173 h 后 HET-40 外壁面轮廓

Fig. 3 The outer wall of HET-40 after 173 h

## 2 半经验公式法计算模型

半经验公式法中的主要计算模型是点源模型, 假设 SPT 放电室通道内所有离子均由一个点源发射出, 以一定角度和能量轰击绝缘层壁面, 造成绝缘层壁面溅射削蚀。实现该方法的理论推导过程见文献 [14] 中的论述, 这里不再赘述。但该文献在实现点源离子流密度分布过程采用了反问题方法, 计算时间较长。本文采用正态分布函数来实现。

SPT 放电通道内的离子流密度分布根据点源模型计算。大量的离子由通道某一位置处的点源以一定角度及能量发射后, 沿直线做变加速运动, 最后入射到绝缘层表面, 其中每个离子的运动过程被认为是相互独立的。根据中心极限定理, 相互独立同分布且期望、方差存在的大量随机变量之和服从正态分布, 则由点源发射出的离子, 其能量及出射角度服从参数为  $\mu_1, \mu_2, \sigma_1,$

$\sigma_2, \rho$  的二维正态分布, 其中  $\mu_1$  和  $\mu_2$  分别表示离子出射角度和能量分布的期望,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别表示离子出射角度和能量分布的方差,  $\rho$  是离子能

量  $\varepsilon$  和出射角度  $\beta$  的相关系数, 即  $\rho=Cov(\varepsilon, \beta) / \sigma_1\sigma_2$ 。由点源发射出的离子流密度可以采用二维连续随机变量的联合密度函数如公式 (1) 所示。

$$J(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right]\right\} \cdot Q \quad (1)$$

式中:  $\mu_1$  一般选择离子沿通道轴向加速能达到的最大能量;  $\mu_2$  选择与放电通道绝缘层平行的方向;  $\sigma_1, \sigma_2$  和  $\rho$  根据前面给出的短寿命实验结果确定;  $Q$  为离子总流量, 根据流量和电离率算出。

根据中心极限定理确定 SPT 放电通道内部离子流密度后, 结合文献 [14] 中的数学模型即可编制计算程序对 SPT 的绝缘层壁面轮廓随时间的溅射侵蚀规律进行计算。

### 3 模拟结果及分析

#### 3.1 结果的验证

由于文献 [12] 针对 SPT-100 进行了短寿命和长寿命的实验测量, 适合用于本文的验证。因此, 这里采用该文献短寿命实验结果获得改进半经验公式法相关常数, 然后模拟计算长寿命的推力器绝缘层内、外壁面的溅射情况, 并与该文献长寿命实验结果进行比较。SPT-100 的基本参数见表 2 所示。根据文献 [12] 的结论, 额定工况下, 推进剂的电离率为 90%。

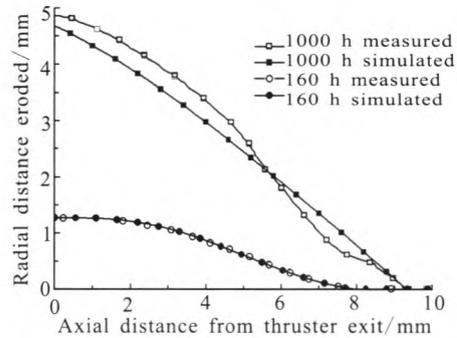
表 2 SPT-100 的基本参数<sup>[12]</sup>

Tab. 2 Basic parameters of SPT-100<sup>[12]</sup>

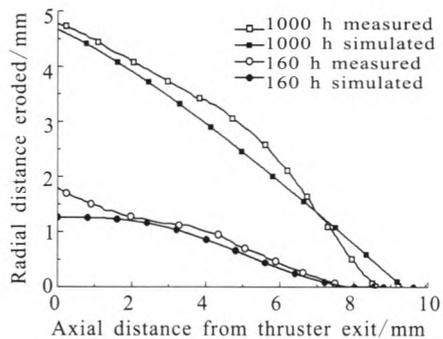
名称	外壁直径/mm	内壁直径/mm	放电电压/V	阳极质量流量/(mg·s <sup>-1</sup> )	通道长度/mm
数值	100	69	300	4.9	24

图 4 给出了半经验公式法计算结果同文献 [12] 前 1 000 h 实验结果的对比。半经验公式法中的待定常数根据 SPT-100 运行 160 h 的实验结果确定。确定待定常数后, 预估 SPT-100 运行 1 000 h 后的壁面轮廓。这里采用各个坐标轴对应的相对误差绝对值的平均值作为平均误差。横

坐标原点表示推力器放电室出口位置, 由图 4 可见, 推力器运行 1 000 h 后, 内壁面平均相对误差为 4.59%, 外壁面平均相对误差为 3.03%, 放电室出口处内壁面预测值绝对误差为 0.201 mm, 外壁面预测值绝对误差为 0.126 mm。通过结果对比认为, 采用运行 160 h 后推力器放电室壁面轮廓确定待定参数, 预估 1 000 h 后壁面轮廓, 半经验公式法计算精度有一定可靠性。



(a) Inner wall



(b) Outer wall

图 4 160 h 寿命实验作为输入条件的改进半经验公式法计算结果与文献[12]实验结果的对比

Fig. 4 Comparison between the results from modified semi-empirical formula method and Ref. [12] when the experimental result at 160 h used for the input condition

图 5 给出了 SPT-100 运行 1 000 h 到 4 000 h 后，采用半经验公式法计算获得的壁面轮廓同实验值进行的对比结果。其中，半经验公式法中的待定参数采用推力器运行 1 000 h 后的壁面轮廓确定。对比结果表明，推力器运行 4 000 h 后，内壁面平均相对误差为 1.93%，由于文献 [12] 的 SPT 外壁面绝缘层只有 5 mm，因此，此时外壁面有一部分已经被消

蚀殆尽或正消蚀完毕，导致实验结果出现较大的波动，因此，此时的平均相对误差较大，为 16.13%，放电室出口处内壁面预测值绝对误差为 0.482 mm，外壁面预测值绝对误差为 0.766 mm。通过结果对比认为，选用运行 1 000 h 后放电室壁面轮廓确定待定参数预估 4 000 h 后壁面轮廓，半经验公式法计算精度比 160 h 更可靠。

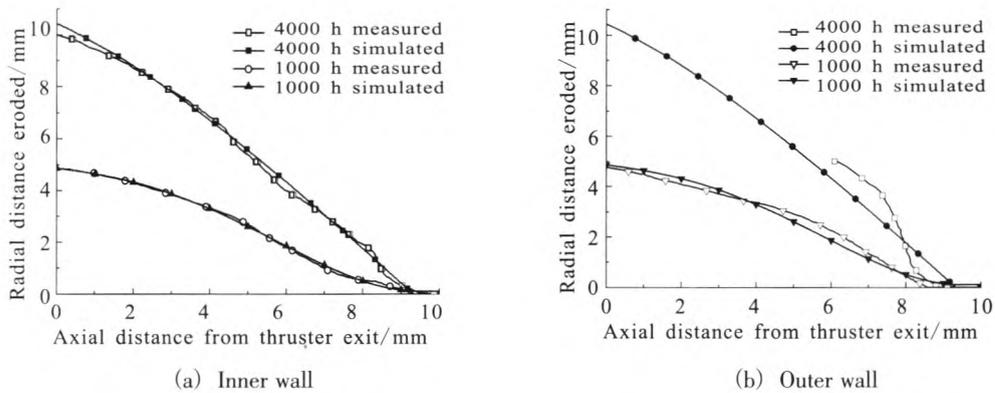


图 5 1 000 h 寿命实验作为输入条件的改进半经验公式法计算结果与文献[12]实验结果的对比  
 Fig. 5 Comparison between the results from modified semi-empirical formula method and Ref. [12] when the experimental result at 1 000 h used for the input condition

### 3.2 影响 HET-40 寿命的主要因素

#### 3.2.1 溅射阈值对寿命的影响

SPT 放电室采用非金属材料作为磁极保护材料，通常选用 SiO<sub>2</sub>、BN 或二者的混合物，某些研究机构也采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体。不同的绝缘层材料，溅射削蚀阈值不同，未来的 SPT 设计中不排除使用新型高溅射阈值的材料。由于绝缘层材料的改变并不影响放电通道内离子流的分布，这里采用表 2 中的 SPT-100 的计算参数。图 6 给出了放电通道绝缘层溅射削蚀阈值改变后，HET-40 运行寿命终结时绝缘层壁面的计算轮廓。从图中可以看出，随着绝缘层溅射阈值的改变，通道壁面受离子溅射影响的区域也发生改变；绝缘层材料溅射阈值越大，放电通道壁面受离子溅射削蚀影响的区域就越小。

图 7 给出了寿命与溅射阈值之间的依变关系，可见，推力器寿命随绝缘层材料溅射阈值的增加而增加，且增加速度逐渐变快。如溅射阈值

由 50 eV 增加至 60 eV 后，推力器寿命由 5 350 h 增加至 10 100 h。由此可见，研制新型耐溅射削蚀材料，提高溅射削蚀阈值对增加推力器寿命至关重要，这是今后设计 SPT 的一个改进方向。

#### 3.2.2 流量对寿命的影响

图 8 给出了 HET-40 寿命随流量的变化关系，可见，在其他参数不变的情况下，推力器寿命随推进剂流量的增加而减小，但减小的速度逐渐放缓。推进剂流量 2.3 mg/s，即放电电流为 2.2 A 时，寿命为 5 350 h。当推进剂流量减少到 1.57 mg/s，即放电电流为 1.5 A 时，寿命增加到 8 015 h，较 2.3 mg/s 的情况下增加了 2 665 h。已知 SPT 在高电压、低电流、小气量工况时离子束的发散角较小<sup>[18]</sup>，结合图 8 的计算结果，推进剂流量减小不仅可以降低绝缘层溅射削蚀速率，还可以减小离子束发散角，也意味着更少的离子运动到绝缘层壁面上，从而减少溅射，寿命会更加延长。

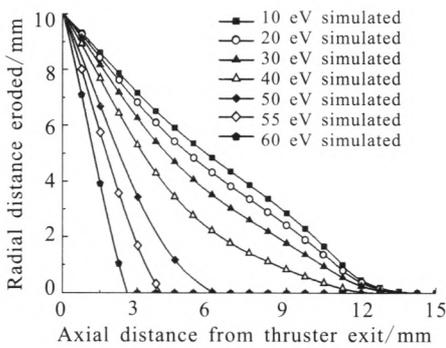


图 6 溅射阈值对 HET-40 放电室壁面轮廓的影响  
 Fig. 6 The relation between HET-40 insulating layer outline and threshold energy

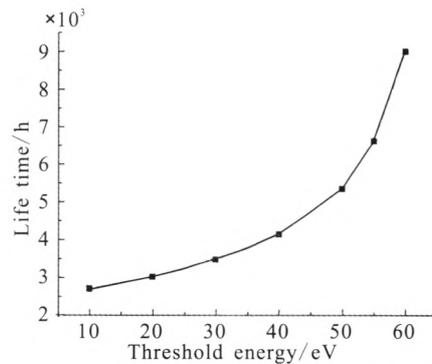


图 7 溅射阈值对 HET-40 寿命的影响  
 Fig. 7 The relation between HET-40 lifetime and threshold energy

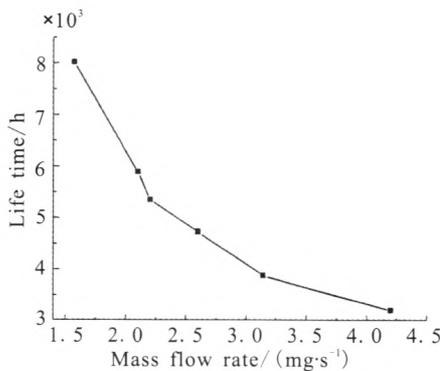


图 8 HET-40 寿命与推进剂流量的关系  
 Fig. 8 The relation between thruster lifetime and propellant flow

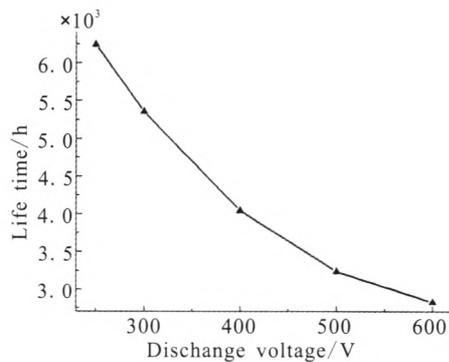


图 9 HET-40 寿命与阳极电压的关系  
 Fig. 9 The relation between HET-40 lifetime and anode voltage

### 3.2.3 阳极电压对寿命的影响

图9 给出了阳极电压对寿命的影响, 可见, 对于 HET-40 来讲, 阳极电压增加则推力器寿命降低, 但寿命减少速度逐渐变缓。由此得出, 在推力满足使用要求的情况下, 适当降低推力器阳极电压可使推力器寿命大幅提高。如当推力器阳极电压减小到 250 V 时, 推力器寿命预估是 6 241 h, 比 300 V 时 5 350 h 的原寿命提高了 891 h。

### 3.2.4 功率对寿命的影响

由于假设推力器其他参数不变, 推力器工作电流与推进剂流量呈正比, 与工作电压的乘积即为推力器功率。综合图 8 和图 9 的数据, 通过换算, 可以给出推力器寿命随其运行功率的变化规律, 见图 10 所示。可以看出推力器寿命随其运行功率的增加而减小, 但减小速率随工作电压的增

加而逐渐降低, 也可以看出, 当其他参数不变时, 推力器寿命与推力器功率的乘积近似为一常数, 对于本文的 HET-40 来讲, 约为  $3.6 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{h}$ 。

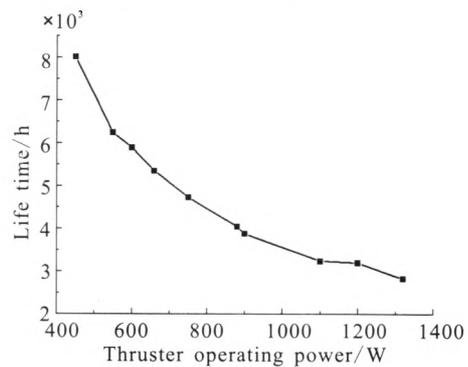


图 10 HET-40 寿命与功率的关系  
 Fig. 10 The relation between HET-40 lifetime and thruster operating power

## 4 结论

针对 HET-40 进行了短寿命实验, 改进了半经验公式法的求解过程, 通过文献长寿命结果对模拟结果验证; 对 HET-40 寿命及其主要因素的影响规律进行研究, 得到如下结论:

1) 设计并实施了在真空舱内针对 HET-40 在标准工况下的短寿命实验, 结果表明, 在 HET-40 运行 173 h 以后, 绝缘层内外壁面均已出现比较明显的溅射消蚀现象, 如内壁面最大消蚀尺寸达到 1.4 mm, 但在本文所采用的 HET-40 工作条件下, 外壁面的溅射程度要稍微低于内壁面。

2) 通过半经验公式法的计算结果与文献长寿命实验结果的对比表明, 结合短寿命实验的半经验公式法对 SPT 寿命计算预估结果具有一定的可靠性, 对 SPT-100 的预估中, 内外壁面最大绝对误差不超过 0.51 mm。采用 1 000 h 短寿命实验数据作为输入参数, 可以预测 4 000 h 运行后 SPT 放电通道的壁面变化, 内壁面平均相对误差为 1.93%。在文献 [14] 的基础上, 对半经验公式法进行了进一步的验证。

3) 采用短寿命实验结果确定半经验公式法相关常数, 考察了多种因素对 HET-40 寿命的影响, 结果表明, 推力器寿命随材料阈值的增大而延长, 随流量和阳极电压的升高而降低, 并且均呈现一定程度的二次曲线趋势; HET-40 寿命随功率的增加也呈现降低的趋势, 并且寿命与功率的乘积基本保持为  $3.6 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{h}$ 。

### 参考文献:

- [1] DEGRYS K, MATHERS A, WELANDER B, et al. Demonstration of 10,400 hours of operation on a 4.5kW qualification model Hall thruster, AIAA 2010-6698[R]. USA: AIAA, 2010.
- [2] CHO S, KOMURASAKI K, ARAKAWA Y. Lifetime simulation of a SPT-Type Hall thruster by using a 2D fully kinetic PIC Model, AIAA 2012-4016 [R]. USA: AIAA, 2012.
- [3] FUKUSHIMA Y, YOKOTA S, KOMURASAKI K, et al. Evaluation method of Hall thruster's lifetime by using multilayer coating[J]. Transactions of JWRI, 2007, 36(1): 113-114.
- [4] CHO S, YOKOTA S, KOMURASAKI K, et al. Multilayer coating method for investigating channel-wall erosion in a Hall thruster [J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 29(1): 278-281.
- [5] LEE S M, ROBERT S J, DAVID H M. 1 000 Hours of testing on a 10 kilowatt Hall effect thruster, AIAA 2001-3773[R]. USA: AIAA, 2001.
- [6] YAMAMOTO N, NAKASHIMA H. Dependence of lifetime on magnetic field configuration in a Hall thruster, AIAA 2012-3791[R]. USA: AIAA, 2012.
- [7] BURTON T, SCHINDER A M, CAPUANO G, et al. Plasma-induced erosion on ceramic wall structures in Hall-effect thrusters [J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(3): 690-695.
- [8] YOKOTA S, MATSUI M, KOMURASAKI K. Estimation of erosion rate by absorption spectroscopy in a Hall thruster, IEPC 2005-037[C]. USA: 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, 2005.
- [9] 扈延林. Hall 推力器寿命预测和壁面侵蚀加速实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [10] PETERSON P Y, Manzella D H. Investigation of the erosion characteristics of a laboratory Hall thruster, AIAA2003-5005[R]. USA: AIAA, 2003.
- [11] SOLODUKHIN A E, SEMENKIN A V. Study of discharge channel erosion in multi-mode anode layer thruster, IEPC 2003-0204 [C]. [S.l.]: International Electric Propulsion Conference, 2003.
- [12] MANZELLA D, YIM J, BOYD I. Predicting Hall thruster operational lifetime, AIAA 2004-3953[R]. USA: AIAA, 2004.
- [13] 于达仁, 扈延林, 李玉全, 等. 霍尔推力器运行参数对通道腐蚀影响的数值分析[C]// 第十三届全国等离子体科学技术会议论文集. 成都: 第十三届全国等离子体科学技术会, 2007: 263-275.
- [14] LOVTSOV A S, SHAGAYDA A A, GORSHKOV O A. Semi-empirical method of Hall thrusters lifetime prediction, AIAA 2006-4661[R]. USA: AIAA, 2006.
- [15] FIFE J M. Two-dimensional hybrid particle-in-cell modeling of Hall thrusters [D]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [16] CHENG S Y M. Modeling of Hall thruster lifetime and erosion mechanisms[D]. MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [17] SOMMIER E, ALLIS M K, CAPPELLI M A. Wall erosion in 2D Hall thruster simulations[C]. USA: 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, 2005.
- [18] 许丽, 王世庆. 圆柱形阳极层霍尔推进器的工作特性与离子束流研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(9): 810-813.

(编辑: 陈红霞)