基于半经验模型的霍尔推力器壁面 腐蚀形貌预测方法研究^{*}

吴 楠,毛 威,沈 岩,胡 鹏,扈延林

(北京控制工程研究所,北京 100190)

摘 要:为了研究霍尔推力器通道壁面溅射腐蚀对于推力器寿命的影响,针对霍尔推力器通道壁面 溅射腐蚀演化过程,建立了预测推力器腐蚀形貌的半经验模型。该模型根据试验测量形貌数据,反推离 子源模型,结合腐蚀速率公式,对霍尔推力器的壁面形貌进行演化预测。分别以SPT-100,T-220及 KM-45短时间的壁面形貌作为输入条件,对不同功率量级推力器的壁面腐蚀过程、预测误差和腐蚀速率 进行了研究。数值模拟结果表明,对于10kW级T-220,1kW级SPT-100以及百瓦级KM-45推力器,壁 面形貌的平均误差分别为2.65%,2.88%和3.64%。推力器壁面形貌的预测结果与实际测量值基本一致, 该模型可用于霍尔推力器壁面形貌预测以及寿命预估。

关键词:霍尔推力器;半经验模型;溅射腐蚀;腐蚀速率 中图分类号:V439.4 文献标识码:A 文章编号:1001-4055(2019)11-2626-07 DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.180604

Wall Corrosion Morphology Prediction of Hall Thrusters Using Semi-Empirical Method

WU Nan, MAO Wei, SHEN Yan, HU Peng, HU Yan-lin

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: To investigate the effects of wall sputtering corrosion on the life of hall thruster, according to the evolution process of wall sputtering corrosion of hall thruster, a semi-empirical model was established to predict the corrosion morphology of hall thruster. Based on the experimental morphological data, this model pushes back the ion source model and combines the corrosion rate formula to predict the wall morphological evolution characteristics of hall thruster. Furthermore, taking the short-term wall morphology of SPT-100, T-220 and KM-45 as input conditions, the wall corrosion process, prediction error and corrosion rate of thrusters with different power levels were analyzed. The simulation results show that the average error of wall morphology for the 10kW -class T-220, 1kW-class SPT-100 and 100W-class level KM-45 thrusters is 2.65%, 2.88% and 3.64%, respectively. The predicted results of wall morphology are basically consistent with the actual measured value, and this model can be used for the prediction of wall morphology and life prediction of hall thruster.

Key words: Hall thruster; Semi-empirical model; Sputter corrosion; Corrosion rate

^{*} 收稿日期: 2018-09-28;修订日期: 2018-12-17。

基金项目:国家自然科学基金(51806011)。

作者简介: 吴 楠,硕士生,研究领域为电推进技术。E-mail: 18810963982@163.com

通讯作者: 毛 威,硕士,高级工程师,研究领域为等离子体推进。E-mail: mwlion@163.com

引用格式: 吴 楠, 毛 威, 沈 岩, 等. 基于半经验模型的霍尔推力器壁面腐蚀形貌预测方法研究[J]. 推进技术, 2019, 40 (11): 2626-2632. (WU Nan, MAO Wei, SHEN Yan, et al. Wall Corrosion Morphology Prediction of Hall Thrusters Using Semi-Empirical Method[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(11):2626-2632.)

1 引 言

霍尔推力器(Hall effect thruster, HET),工作原 理^[1-2]如图1所示,自20世纪70年代以来,以其结构 简单、比冲高、效率高等优点,已经成为空间航天飞 行器首选电推进装置之一。它不仅可作为空间航天 器的姿态控制、位置保持等控制装置,也可作为星际 航行的主推力器^[3-4]。随着卫星向着长寿命、高功率 方向发展的趋势,对霍尔推力器的寿命提出了更高 的要求。对于技术成熟的SPT系列霍尔推力器来说, 其寿命大约在7×10³h,而对于深空探测任务,则要求 推力器寿命达到1×10⁴h以上^[5-6]。放电通道内壁面的 溅射腐蚀速率直接影响推力器的寿命^[7-10]。

目前,已经有大量的机构利用地面实验测量的 方法研究霍尔推力器寿命,美国[11],俄罗斯[12-13]分别 对 SPT-100 进行了长达 5730.3h 和 7008h 的地面寿命 测试,NASA着手于高功率推力器T-220的实验测试, 使用激光轮廓技术详细测量了0,519h,1013h的相关 腐蚀数据^[14]。2006年末, Snecma公司研制的 PPS-1350-G推力器累计地面试验测试10500h,证实了推 力器能在长时间的运行和不同工作条件下(如不同 功率)可保持高性能^[15], Aerojet对 BPT-4000进行测 试,实验总时长6750h,除了测量工作周期的性能参 数,研究人员还根据壁面形貌分析了壁面的腐蚀特 性并预测了 BPT-4000 的寿命^[16],以上寿命试验记录 了大量推力器工作参数和测试数据。实验测量可以 最直接最真实地反映出通道壁面溅射腐蚀情况。但 是,按1:1进行全寿命试验的成本很高,并且测试过 程中只能得到确定时刻的壁面形貌,并不能反映出 壁面的演化过程。因此,在理论分析的基础上, Mikellides 等^[17-18]建立的二维流体模型 Hall2De, NASA采用Hall2De模型,对XR-5^[19]推力器的壁面形 貌的腐蚀过程进行了预估,Hirakawa^[20]建立了基于 PIC 的全粒子模拟以及 Fife^[21]提出的二维混合模型等 数值模拟模型。

以上关于霍尔推力器寿命研究均取得良好效 果,但是,实验测量虽可较准确地验证寿命,但对试 验的经验系数有强依赖性,且仅能预测结构类似的 推力器形貌^[22];数值模拟模型由于假设太多且缺乏 在氙离子影响下精确的陶瓷材料腐蚀规律,将会影 响结果的精度^[23]。半经验模型,即将短时间寿命试 验与数值模拟相结合的模型,预测壁面形貌的演化 过程,一方面可以减少试验时间及成本,另一方面可 以提高数值计算结果的精度。



Fig. 1 Operation principle of HET

本文针对霍尔推力器通道的溅射腐蚀过程,根据 Garner等^[11]对SPT-100,Hofer等对T-220及Gorshkov 等对KM-45三种推力器的试验测量形貌数据,反推离 子源模型,结合腐蚀速率公式,对霍尔推力器的壁面 形貌进行演化预测。在此基础上,计算了三种推力器 的体积腐蚀速率,验证模型的正确性与可行性,进而 有助于预估霍尔推力器的腐蚀形貌。

2 数值模型及算法

2.1 推力器通道基本模型

霍尔推力器是具有环形通道的轴对称结构,对 其物理过程的描述一般都在柱坐标下进行,分别是 轴向z,径向r以及周向θ。考虑到推力器的周向对称 性,因此该模型可在二维坐标系中研究(z,r)。内外 壁面的位形分别用函数r_i(z)与r_o(z)表示,几何模型如 图2所示,z和r分别表示推力器的轴向和径向。假设 运动到通道壁面的离子流是从坐标为(z_s,r_s)的点源 产生的,离子入射方向与径向的夹角为α,离子打到 推力器壁面腐蚀带上某点的切线方向与轴向的夹角



Fig. 2 Geometry of the region modeled

为β。根据几何关系,得到离子打到器壁表面的入射 角度γ=α+β。由于描述内外陶瓷壁面形貌演化的模 型方程具有相同的形式,因此在下文中略去下标 i 与o。

离子入射参数分布与角度 α 以及离子能量 ε 的关系用函数 $\Gamma(\alpha, \varepsilon)$ 表示, $\Gamma(\alpha, \varepsilon)$ d α d ε 定义为单位时间内从点源发射的角度在[α, α +d α]能量在[ε, ε +d ε]内的离子个数。则溅射腐蚀速率可表示为

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \left[\int_{0}^{\varepsilon_{m}} \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon} \cdot Y(\boldsymbol{\gamma},\boldsymbol{\varepsilon}) \cdot \boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\varepsilon})\right] \mathrm{d}\boldsymbol{\alpha} \qquad (1)$$

式中V表示基材体积, *e*_m是离子的最大入射能量。易知, 被溅射出的体积与器壁表面的腐蚀速度成正比, 因此, 有

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial r}{\partial t} \cdot \mathrm{d}z \tag{2}$$

于是

$$\frac{\partial r(z,t)}{\partial t} = \left[\int_{0}^{e_{m}} \mathrm{d}\varepsilon \cdot Y(\gamma,\varepsilon) \cdot \Gamma(\alpha,\varepsilon) \right] \frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}z} \qquad (3)$$

对于内外陶瓷壁面,公式(3)可写为

$$\frac{\partial r(z,t)}{\partial t} = \pm \left[\int_{0}^{\varepsilon_{m}} \mathrm{d}\varepsilon \cdot Y(\gamma,\varepsilon) \cdot \Gamma(\alpha,\varepsilon) \right] \frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}z} \quad (4)$$

其中,内壁面的公式右端项中含有"-"号。以下 均同。在公式(3)中,角度α与坐标的关系可以表 示为

$$\alpha = \arctan\left[\pm \frac{z - z_s}{r - r_s}\right]$$
(5)

又有 $\gamma=\alpha+\beta$,角度 β 与坐标的关系为

$$\boldsymbol{\beta} = \arctan\left[\pm \frac{\partial r(z,t)}{\partial z}\right] \tag{6}$$

函数 r(z)表示壁面形貌的演化,公式(5)微分,可以得到

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}z} = \frac{1}{\left[1 + \frac{z - z_{\mathrm{s}}}{r - r_{\mathrm{s}}}\right]^{2}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z} \left[\pm \frac{z - z_{\mathrm{s}}}{r - r_{\mathrm{s}}}\right] =$$

$$\pm \frac{\left[r(z,t) - r_{\mathrm{s}}\right] - (z - z_{\mathrm{s}})\frac{\partial r}{\partial z}}{\left[r(z,t) - r_{\mathrm{s}}\right]^{2} + (z - z_{\mathrm{s}})^{2}}$$

$$(7)$$

将公式(7)代入到公式(4),得到器壁形貌随时 间演化的微分方程为

$$\frac{\partial r(z,t)}{\partial t} = \left[\int_{0}^{s_{m}} d\varepsilon \cdot Y(\gamma,\varepsilon) \cdot \Gamma(\alpha,\varepsilon) \right] \cdot \frac{\left[r(z,t) - r_{s} \right] - (z - z_{s}) \frac{\partial r}{\partial z}}{\left[r(z,t) - r_{s} \right]^{2} + (z - z_{s})^{2}}$$
(8)

对于推力器通道氮化硼陶瓷的微观溅射腐蚀过

程而言,离子能量通常在1keV以下,属于低能重离子 溅射^[24],根据Sigmund的理论,影响溅射产额Y的两 个因素能量溅射产额 $Y_{s}(\varepsilon)$ 和角度溅射产额 $Y_{y}(\gamma)$ 可 以视为是相互独立的,即有

$$Y(\gamma, \varepsilon) = Y_{\gamma}(\gamma) \cdot Y_{\varepsilon}(\varepsilon)$$
(9)
将公式(9)代人公式(8),得到

$$\frac{\partial r(z,t)}{\partial t} = \frac{\left[r(z,t) - r_{s}\right] - (z - z_{s})\frac{\partial r}{\partial z}}{\left[r(z,t) - r_{s}\right]^{2} + (z - z_{s})^{2}} \cdot (10)$$
$$Y_{\gamma}(\gamma) \cdot F(\alpha)$$
$$\rightrightarrows \quad F(\alpha) = \int_{0}^{\varepsilon_{m}} Y_{\varepsilon}(\varepsilon) \cdot \Gamma(\alpha,\varepsilon) \, \mathrm{d}\varepsilon_{\circ}$$

从式(10)可以看出,*F*(α)实际上包含了壁面材 料特性及离子束入射参数等信息,将*F*(α)定义为溅 射强度。如果角度溅射产额*Y*_y(γ)和函数*F*(α)已知, 就可以预测在未来的一段时间内器壁表面形貌随时 间演化的结果。

2.2 溅射腐蚀函数的计算

Yamamura 等^[25]根据大量材料溅射的实验结果, 总结给出了 $Y_{\gamma}(\gamma)$ 的经验拟合公式如下

$$Y_{\gamma}(\gamma) = \left(\frac{1}{\cos\gamma}\right)^{J} \exp\left[-f\cos\gamma_{opt}\left(\frac{1}{\cos\gamma} - 1\right)\right]$$
(11)

对氮化硼陶瓷来说,f = 2.23, $\gamma_{opl} = 67.9^{\circ}$ 。因此,如何得到包含离子束入射参数的函数 $F(\alpha)$,是进行加速寿命实验预测的关键。

为了便于求解,将点源发射的离子束等效处理 为不同发射方向的离子射线的集合,即 $F(\alpha)$ 定义在 一组离散的角度集 $\{\alpha_i; i=1,2,...N\}$ 上,见图3。本文 将采用如下方式确定 $F(\alpha)$,其形式为

$$F(\alpha_i) = \sum_{j,k} m_{j,k} \exp\left[-\frac{\left(\alpha_j - \alpha_i\right)^2}{n_{j,k}^2}\right]$$
(12)



model

随着离子发射角度偏离节点*i*,离子溅射强度呈 指数衰减。式中,角度集的大小*N*等于直接差分法在 离散器壁表面时使用的节点数。对于第*i*个节点来 说, $\{m_{j,k}, n_{j,k}; j=1,2, ..., N, k=1,2,3, ...\}$ 是构成函数 $F(\alpha_i)$ 的系数集, m_j 是发射角为 α_j 的离子射线对节点*i* 的溅射强度, n_j 是发射角为 α_j 的离子射线对节点*i*的 溅射强度的衰减系数,确定 $\{F(\alpha_i); i=1,2, ...N\}$ 的方 法如下:

(1)根据实验测量M个不同时刻的器壁表面形 貌 $r_{exp}(z,t)$;为了保证加速寿命实验的预测精度,一般 情况下需要M>2。

(2)把M组实验形貌数据中的一部分作为起始 形貌值,另一部分作为与计算结果进行比较的校准 形貌值。起始形貌与校准形貌必须是对应的,这样 预测的时间间隔便确定了。m_{i,k}初始值m_{i,0}只考虑 $F(\alpha_i)$ 受到发射角为 $\alpha_i=\alpha_i$ 的离子射线的作用,通过式 (10)获得。根据公式(5)计算获得每一个节点对应 离子入射方向与径向的夹角为α;,由于发射角α;的溅 射强度还受到同一条测量形貌上相邻节点角度的影 响,因此选取*n*的初始值 $n_{i,0}=(\alpha_{i+1}-\alpha_{i-1})/2$,利用系数集 初值{m_i, n_i}获得的计算结果与校准形貌进行比 较,便得到两者之间的方差 σ_0 。然后,选取一组新的 系数集 $\{m_{i,1}, n_{i,1}\}, m_{i,1}$ 取 $m_{i,0}$ 与形貌比较误差百分比 值的乘积, $n_{i,1}$ 仍取 $n_{i,0}$,加上 $\{m_{i,0}, n_{i,0}\}$ 确定的计算结 果,确定新的 $\{F(\alpha_i)\}$ 。计算新的结果与校准形貌比 较,如果此时两者的方差 $\sigma_1 < \sigma_0$,那么认为 $\{m_{i,1}, n_{i,1}\}$ 是有效的,将 $\{m_{i,1}, n_{i,1}\}$ 加入到 $\{m_{i,k}, n_{i,k}\}$ 队列中,否则 重新选取一组 $\{m_{i,1}, n_{i,1}\}$,重新选取的 $m_{i,1}=0.8m_{i,0}, n_{i,0}$ 不变。如此周而复始,总是使得在选取一组新的系 数集 $\{m_{i,k}, n_{i,k}\}$ 之后满足 $\sigma_k < \sigma_{k-1}$,直到新的系数集使 得函数 $F(\alpha)$ 变化量很小或者方差 σ 不再减小为止。 最小方差对应的离子源位置即为最佳位置 $(z_{\rm s,opt}, r_{\rm s,opt})_{\circ}$

(3)在确定了最佳离子源位置(*z*_{s.opt}, *r*_{s.opt})以及系数集{*m*_{*j.k*}, *n*_{*j.k*}; *j* = 1, 2, …, *N*, *k* = 1, 2, 3, …}之后,便可预测一个长的时间间隔内器壁被腐蚀的形貌。

3 结果分析

霍尔推力器壁面腐蚀模型中,壁面演化数值模型通过 Matlab 编程实现,流程见图4,最终输出不同腐蚀时刻的壁面形貌轴向分布。

本 文 分 别 对 三 种 典 型 的 推 力 器 (100W 级 KM-45^[21], kW 级 SPT-100^[10-13] 以 及 10kW 级 T-220^[14]) 进

行数值模拟,预测其壁面的形貌,各不同型号推力器的基本参数见表1。



Fig. 4 Flow chart of the algorithm

Table 1 Basic parameters of three kinds of thrusters

Thruster	Power/W	Discharge voltage/V	Thrust/mN	Specific impulse/s
SPT-100	1350	300	80	1600
T-220	10000	500	500	2200
KM-45	325	310	18	1400

3.1 SPT-100模拟结果分析

(1)基于 SPT-100 工作 310h,600h,800h 的实测 形貌预测 1000h 和 2400h 的内外壁面腐蚀形貌,见图 5。由图可见,出口处腐蚀最严重,预测 1000h 时出口 处的内、外壁面腐蚀深度分别为 4.83mm 和 5.01mm, 预测 2400h 时距出口 5.6mm 处内、外壁面腐蚀深度分 别为 4.53mm 和 4.94mm;对于内壁面,1000h 预测形貌 与测量形貌最大误差为 0.09mm,预测效果较好, 2400h 的最大误差为 0.5mm,误差相对较大,但在允许 范围内。研究表明,数值模拟结果与实验测量形貌 基本相符。

(2)为了验证壁面形貌模拟结果的准确性,选择 两种不同时间间隔的实验形貌对4000h后壁面的形 貌进行预测。预测1中选择310h,600h和800h的实 测形貌为初始条件,预测2中选择160h,600h和 2400h的实测形貌为初始条件。这两种方法对内、外 壁面形貌的预测结果如图6所示。

由计算可得,预测1与实际形貌的最大误差在距 出口4.8mm处,为2.84mm,平均误差为14.2%,预测2 与实际形貌的最大误差在距出口1.2mm处,为 1.2mm,平均误差为3.7%。

由以上分析可知,以160h,600h,2400h的实验测 量形貌为初始条件可以更好地预测4000h的壁面腐 蚀的演化形貌。这证明了选择合适的形貌测量时间 直接影响预测结果的精度,初始条件选取时间间隔 较短的实验形貌数据预测较长时间的形貌会使预测 结果不准确,这是由于推力器运行过程中,壁面腐蚀 速率的差异造成的,腐蚀速率将在后文讨论。

3.2 T-220及KM-45模拟结果分析

考虑到测量的不准确及单一推力器验证的偶然性,本文参考T-220及KM-45的实验结果,进一步验证半经验模型的可靠性。

(1)由于T-220的实验数据仅有三个时刻,因此 仅根据0h,519h两个测量时刻来预测1013h的内外 壁面腐蚀演化形貌,见图7。内、外壁面的最大误差 分别为9.8%(0.78mm)和10%(0.84mm),且内壁面出 口处预测形貌存在明显的回弯,与模拟结果误差较 大。进一步表明,半经验模型法预测腐蚀形貌,至少 要三个时刻的实测形貌数据,仿真结果才会更 准确。



(2)图 8显示了预测时间为 1020h时 KM-45 通道









Fig. 7 Calculated and measured wall profiles of T-220



内外壁面的腐蚀形貌仿真结果,通过计算得出内壁 面的预测形貌与测量形貌的平均误差及最大误差为 3.5%(0.16mm)和8.2%(0.37mm),外壁面的预测形貌 与测量形貌的平均误差及最大误差为2%(0.09mm) 和7%(0.32mm),误差很小,模拟的腐蚀形貌与测量 形貌具有很好的一致性。

3.3 壁面预测误差百分比及腐蚀速率验证

图 9 给出了 KM-45, SPT-100 和 T-220 对于 1020h壁面预测误差百分比。对于百瓦级 KM-45 而 言,壁面预测误差<1%,于千瓦级 SPT-100 而言,壁面 预测误差<5%,而十千瓦级 T-220 的壁面预测误差低 于 10%。由于高功率级推力器的国内外试验测量数 据较少,因此高功率量级推力器壁面形貌的预测误 差较大。



Fig. 9 Percentage of wall prediction error

图 10表示通过 SPT-100和T-220测量数据计算 得到的腐蚀速率^[22]。图 11 是利用半经验模型预测得 到不同功率霍尔推力器的壁面腐蚀形貌后,计算获 得的体积腐蚀速率。从数值计算和实验测量结果可 以看出,霍尔推力器在工作初期的体积腐蚀速率较 大。以T-220为例,100h以内的腐蚀速率较 大。以T-220为例,100h以内的腐蚀速率可达 60mm³/h,1000h的腐蚀速率降低到 8mm³/h。此外,数 值计算和实验测量结果一致表明,高功率推力器的 腐蚀速率较低功率推力器的腐蚀速率更大。SPT-100和KM-45的工作电压均接近于 300V,但从图 11 可以看出,SPT-100的腐蚀速率明显高于KM-45。



Fig. 11 Erosion rate of calculated profiles

4 结 论

本文建立了霍尔推力器壁面形貌预测的半经验 模型,并分别对不同功率量级推力器 SPT-100,T-220 及 KM-45 的壁面腐蚀过程进行了数值计算,得到如 下结论:

(1)针对三种不同功率量级推力器,该半经验模型对推力器壁面形貌的预测结果与实际测量值基本一致,从而验证了该模型对于不同功率量级霍尔推力器壁面形貌预测的可行性。

(2)利用不同时间间隔的实测形貌作为初始条件直接影响预测结果的精度,较短的实验形貌数据

预测较长时间的形貌会使预测结果不准确,且至少 要三个时刻的实测形貌数据,预测结果才会更准确。

(3)预测误差的分析结果表明,该模型对于十千 瓦级 T-220、一千瓦级 SPT-100以及百瓦级 KM-45 推 力器壁面形貌的平均误差分别为 2.65%, 2.88% 和 3.64%。因此,该模型对于霍尔推力器壁面形貌的预 测误差低于 5%。

(4)腐蚀速率计算表明,霍尔推力器在工作初期的体积腐蚀速率较大,随着工作时间的增加,其腐蚀 速率会不断减缓最后保持稳定。十千瓦级T-220在 100h以内的腐蚀速率可达60mm³/h,而在1000h后的 腐蚀速率降低到8mm³/h。

致 谢:感谢国家自然科学基金资助。

参考文献:

- Goebel D M, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters [M]. USA: John Wiley & Sons, 2008.
- [2] 于达仁.空间电推进原理[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.
- [3] Oleson S R, Sankovic J M. Advanced Hall Electric Propulsion for Future In-Space Transportation [R]. NASA-TM-2001-210676.
- [4] 吴汉基,蒋远大,张志远.电推进技术的应用与发展 趋势[J].推进技术,2003,24(5):385-392.(WU Han-ji, JIANG Yuan-da, ZHANG Zhi-yuan. Application and Development Trend of Electric Propulsion Technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24 (5):385-392.)
- [5] Morozov A I. Electric Propulsion Thrusters and Plasma Dynamics [C]. Moscow: 24th Electric Propulsion Conference 1995.
- [6] Jankovsky R, Jacobson D, Sarmiento C, et al. NASA's Hall Thruster Program 2002[R]. AIAA 2002–3576.
- [7] Koizumi H, Komurasaki K, Arakawa Y. Numerical Prediction of Wall Erosion on a Hall Thruster[J]. Vacuum, 2008, 83(1): 67-71.
- [8] Eagle W, Boyd I, Trepp S, et al. The Erosion Prediction Impact on Current Hall Thruster Model Development[R]. AIAA 2008-5087.
- [9] 毛根旺, 唐金兰. 航天器推进系统及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009.
- [10] Kim V. Main Physical Features and Processes Determining the Performance of Stationary Plasma Thrusters [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 736-743.

- [11] Garner C, Brophy J, Polk J, et al. A 5730-hr Cyclic Endurance Test of the SPT-100[C]. San Diego: 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1995.
- [12] Absalamov S K, Andreev V B, Colbert T, et al. Measurement of Plasma Parameters in the Stationary Plasma Thruster (SPT-100) Plume and Its Effect on Spacecraft Components[R]. AIAA 92-3156.
- [13] Arkhipov B, Gnizdor R, Kozubsky K N, et al. SPT-100 Module Lifetime Test Results [R]. AIAA 94-2854.
- [14] Mason L S, Jankovsky R S, Manzella D H. 1000 Hours of Testing on a 10 Kilowatt Hall Effect Thruster [R]. AIAA 2001-3773.
- [15] Cornu N, Marchandise F, Darnon F, et al. PPS 1350 Qualification Demonstration: 10500 hrs on the Ground and 5000 hrs in Flight[R]. AIAA 2007-5197.
- [16] Hofer R R, Goebel D M, Snyder J S, et al. BPT-4000 Hall Thruster Extended Power Throttling Range Characterization for NASA Science Missions [C]. Michigan: 31st International Electric Propulsion Conference, 2009.
- [17] Mikellides I, Katz I, Hofer R. Design of a Laboratory Hall Thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase I: Numerical Simulations[R]. AIAA 2011-5809.
- [18] Mikellides I G, Katz I. Numerical Simulations of Hall-Effect Plasma Accelerators on a Magnetic-Field-Aligned Mesh[J]. Physical Review E, 2012, 86(4).
- [19] Lopez Ortega A, Jorns B, Mikellides I G, et al. Numerical Simulations of the XR-5 Hall Thruster for Life Assessment at Different Operating Conditions [R]. AIAA 2015– 4008.
- [20] Hirakawa M. Electron Transport Mechanism in a Hall Thruster[C]. Cleveland: 25th International Electric Propulsion Conference, 1997.
- [21] Fife J M. Two-Dimensional Hybrid Particle-In-Cell Modeling of Hall Thrusters [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [22] Lovtsov A, Shagayda A, Gorshkov O. Semi-Empirical Method of Hall Thrusters Lifetime Prediction [R]. AIAA 2006-4661.
- [23] Peterson P, Manzella D, Jacobson D. Investigation of the Erosion Characteristics of a Laboratory Hall Thruster [R]. AIAA 2003-5005.
- [24] Kim V, Abgaryan V, Kozlov V, et al. Development of the Accelerated Test Procedure for the SPT Discharge Chamber Wall Wearing During Long Thruster Operation [R]. AIAA 2003-5003.
- [25] Yamamura Y, Shindo S. An Empirical Formula for Angular Dependence of Sputtering Yields [J]. Radiation Effects, 1984, 80(1-2): 57-72.