磁屏蔽霍尔推力器磁极腐蚀数值模拟研究 *

刘　祺[1,2]，扈延林[1,2]，毛　威[1,2]，姚兆普[1,2]，李　永[1,2]

（1. 北京控制工程研究所，北京 100190；
2. 北京市高效能及绿色宇航推进工程技术中心，北京 100190）

摘　要：磁极腐蚀问题成为磁屏蔽霍尔推力器的主要寿命失效模式。为了研究磁极腐蚀的机理，本文基于粒子网格方法建立推力器放电的数值仿真模型，结合溅射模型模拟磁极腐蚀现象，统计磁极表面收集的入射离子运动状态，获取磁极腐蚀特性，据此探究磁极腐蚀的机理以及影响磁极腐蚀速率的因素。结果表明：磁屏蔽霍尔推力器出口倒角附近形成的高原子密度区同时也是径向电场占主导的区域，在此处电离产生的低速离子易于径向发散进而偏转向磁极方向运动。磁极表面腐蚀现象呈现径向分布不均的特点，内磁极附近轴对称电场对离子的作用是导致磁极中心腐蚀速率远高于其他位置的主要原因。

关键词：磁屏蔽；霍尔推力器；数值模拟；磁极腐蚀；离子电流密度

中图分类号：V439^{+}.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-4055（2023）06-2208102-08

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 2208102

Numerical Simulation on Pole Erosion in a Magnetically Shielded Hall Thruster

LIU Qi[1,2]，HU Yan-lin[1,2]，MAO Wei[1,2]，YAO Zhao-pu[1,2]，LI Yong[1,2]

（1. Beijing Institute of Control Engineering，Beijing 100190，China；
2. Beijing Engineering Research Center of Efficient and Green Aerospace Propulsion Technology，
Beijing 100190，China）

Abstract：The problem of pole erosion becomes the main ineffective mode of lifetime for magnetic shielding Hall thruster. In order to study the mechanisms of the pole erosion，a numerical model of thruster discharge process was established based on particle-in-cell method. Combining with the sputtering model，the erosion phenomenon was simulated. Statistics on the motion of the collected ions sputtering on the poles could provide pole erosion characteristics. Then the erosion mechanisms and the influential factors on the pole erosion rate were analyzed. The numerical results show that in the region of high neutral density near the channel exit chamfer，the radial electric field dominates，where newborn ions at low velocity tend to diverge radially and move to the poles. The poles are unevenly eroded and the erosion rate at the center of the inner pole is much higher than the other radial positions due to the ions in confinement of the axisymmetric electric field in the vicinity of the inner pole.

Key words：Magnetic shielding；Hall thruster；Numerical simulation；Pole erosion；Ion current density

* **收稿日期**：2022-08-31；**修订日期**：2022-12-23。
基金项目：国防基础科研项目（JCKY2021603B033）。
作者简介：刘　祺，博士，工程师，研究领域为空间电推进技术。
通讯作者：李　永，博士，研究员，研究领域为先进空间推进技术。E-mail：liyongaay@163.com
引用格式：刘　祺，扈延林，毛　威，等. 磁屏蔽霍尔推力器磁极腐蚀数值模拟研究[J]. 推进技术，2023，44(6)：2208102.（LIU Qi，HU Yan-lin，MAO Wei，et al. Numerical Simulation on Pole Erosion in a Magnetically Shielded Hall Thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*，2023，44(6)：2208102.）

1 引 言

霍尔推力器的壁面腐蚀现象曾是制约其长期在轨服役的重要问题。美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory,JPL)在BPT-4000霍尔推力器的寿命试验中发现,推力器工作5600h之后壁面腐蚀现象停止;进一步的仿真研究结果表明,当放电通道由于腐蚀而退到稳态位置后,磁场与放电通道相对位形的改变引发了近壁等离子体和鞘层的一系列变化并屏蔽了离子对壁面的轰击,因此通道壁面腐蚀速率、入射离子总能量和离子电流密度都大幅下降[1-2]。对磁屏蔽物理机制的进一步研究表明,理论上磁屏蔽设计能够使离子向壁面运动的动能和鞘层能量降低一个数量级以上,使指向壁面的离子流量减小三个数量级[3]。在磁屏蔽的磁场构型中,磁力线曲率较大且与壁面不相交,基于磁力线等势条件,该构型能够使壁面附近维持高电势,减小了壁面腐蚀的速率。至此,在磁屏蔽技术的应用之下,霍尔推力器壁面腐蚀所导致的寿命问题得到了解决[4]。

然而,磁屏蔽的设计在解决壁面腐蚀问题的同时,也带来了新的问题。霍尔推力器中磁场的变化会引发等离子体和电场分布特性、等离子体传导等一系列变化。与传统构型相比,磁屏蔽构型的磁场峰值位置偏向下游,位于通道出口附近。在磁场峰值处,电子被较强磁场束缚而集中在通道出口附近,电子与工质发生电离碰撞,因此电离区也随着磁场向下游移动。由于带电粒子位置的变化,电势发生大幅下降的位置即加速区也向下游移动。综上,离子加速过程发生变化,加之通道出口倒角结构的设计,使离子对壁面的轰击减少,离子转而轰击磁极,因此在实验中推力器的磁极表面发生了腐蚀现象[5-6]。磁极腐蚀成为磁屏蔽霍尔推力器寿命的主要失效模式,因此,关于磁极腐蚀特性和机理的研究受到了广泛的关注。

NASA格林研究中心针对12.5kW磁屏蔽霍尔推力器HERMeS的磁极腐蚀现象开展了一系列磨损实验研究[7-8],探究了放电电压、磁场强度等参数对磁极腐蚀特性的影响规律。Grimaud等[9]开展了磁极表面附近等离子体诊断实验,研究结果表明存在大量离子轰击磁极,然而对于离子是如何向磁极加速运动的问题,还难以给出解释。JPL将Hall2De代码应用于磁屏蔽霍尔推力器内磁极腐蚀的评估[10-11],仿真结果表明推力器通道出口处电场等势线的曲率导致离子径向加速,虽然径向发散的高能离子所产生的电流密度比轴向离子电流密度低三个数量级,但足以在磁极表面形成明显的溅射[12]。

以上研究表明,离子对磁极的溅射是磁极腐蚀的主要原因,因此明确离子的运动状态是揭示磁极腐蚀机理的关键。在以上研究中,实验方面主要的研究对象是磁极表面附近的等离子体特性,限于实验条件,难以得出实际入射到磁极表面的离子运动状态。与实验研究相比,已有的仿真研究更加细致地描述了磁极腐蚀速率以及磁极表面附近的等离子体特性。然而,对于发生溅射的离子本身的运动特性仍缺乏统计分析。丁永杰等[13]在磁极腐蚀问题的研究中提出,羽流中的空间电势高于磁极电势是离子向磁极方向运动的主要原因,而对于发生溅射的离子是如何产生的还需进一步研究。此外,由于实验中普遍观察到内磁极腐蚀现象比外磁极更加显著,因此已有研究主要关注的是内磁极腐蚀特性,而内、外磁极腐蚀速率的差异现象有望为解释磁极腐蚀机理提供新的角度。

本文基于粒子网格-蒙特卡洛碰撞(Particle-in-cell and Monte Carlo collision,PIC-MCC)仿真方法模拟磁极腐蚀现象,并根据仿真中记录的离子运动状态描述内、外磁极的腐蚀特性,在此基础上研究磁极的腐蚀机理。

2 磁极腐蚀现象

本研究团队在三款霍尔推力器寿命试验中观测到磁极表面状态如图1所示。从图中可以看出,传统磁场构型的霍尔推力器(图1(a))磁极表面未见明显的腐蚀,而在具有磁屏蔽设计的霍尔推力器(图1(b),(c))磁极表面均能够观察到腐蚀现象,且两款推力器的磁极腐蚀具有如下规律:(1)内磁极的腐蚀现象比外磁极更为显著;(2)内磁极表面的腐蚀呈现非均匀分布的特点,中心区域的腐蚀最明显。文献[14-15]中的部分实验结果也表明,内磁极靠近轴对称中心处的腐蚀速率较高。此外,NASA和JPL在HERMeS霍尔推力器的长期磨损试验中也发生了磁极腐蚀的问题,并通过添加保护层对磁极表面进行被动的防护[14,16]。因此,磁极腐蚀是磁屏蔽霍尔推力器长时间工作后发生的普遍现象。磁屏蔽霍尔推力器内磁极中心位置的显著腐蚀现象会对寿命期间磁场的结构稳定性产生影响,此外,磁极中心位置的严重腐蚀还制约了阴极中置技术在该推力器上的应用。

(a) 1.35kW unshielded Hall thruster after 100h operation

(b) 1.35kW partially shielded Hall thruster after 100h operation

(c) 600W partially shielded Hall thruster after 1000h operation

Fig. 1　Magnetic poles after wear tests

3　数值仿真模型

采用PIC方法模拟磁屏蔽霍尔推力器的放电过程，能够追踪磁极表面入射离子的运动状态，结合溅射腐蚀模型，获得磁极的腐蚀特性。

3.1　PIC-MCC方法

全粒子PIC-MCC方法将计算中所考虑的电子、一价氙离子和氙原子均视为粒子处理，能够获取每一个仿真粒子运动状态的信息，其中离子的运动状态对于磁极腐蚀研究至关重要。本文的仿真工作基于自主开发的PIC-MCC代码，该代码此前已应用于霍尔推力器的数值模拟研究[17]。

仿真研究的模型是本课题组研制的1.35kW磁屏蔽霍尔推力器，放电电压为360V，阳极流量为4.5mg/s。建立推力器的二维轴对称模型，并考虑轴向、径向和周向三个方向的速度。计算域和边界条件如图2所示，计算域包括放电通道、通道出口区域以及磁极表面附近区域，磁极表面材料为铁。

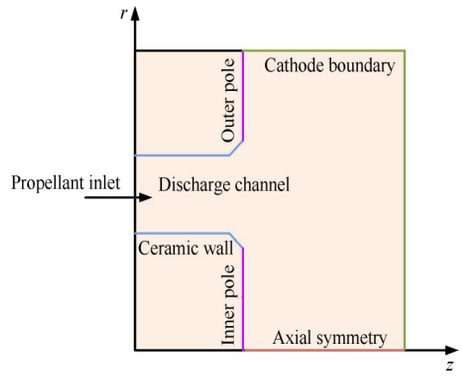


Fig. 2　Computational domain and boundary conditions

MCC模型中考虑的碰撞类型包括：电子与原子之间的弹性碰撞、激发碰撞、电离碰撞，以及原子之间的弹性碰撞。考虑到离子与原子之间的弹性碰撞和电荷交换碰撞对离子轴向速度分布的影响较小[18]，为了简化模型和提升计算速度，仿真中忽略这两种碰撞。模型中考虑电子近壁传导以及Bohm反常传导[19]。由于PIC方法的计算量庞大，为了提高计算速度和降低内存压力，采用了宏粒子（一个仿真粒子代表5×10^8个真实粒子）、增大真空介电常数（增大倍数$\gamma^2=1600$）以及减小重粒子质量（将离子和原子的质量减小100倍）的方法，并针对减小重粒子质量对离子速度等产生的影响进行了参数恢复。具体的方法应用见文献[19]。

电场通过求解泊松方程得出，采用动态交替方向隐式迭代法（DADI）求解离散后的泊松方程[20]，该方法引入虚拟时间项加速收敛：

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t}+\nabla^2(\varepsilon\phi)=-\rho \tag{1}$$

式中ϕ为电势（V），ρ为净电荷密度（C/m^3），ε为真空介电常数。

在PIC方法的基础上，增加磁极表面离子收集模块。仿真中运动到磁极的离子通常作删除处理，而本文将离子的位置和速度进行存储，据此获取离子的能量、角度分布函数等统计结果，还能够得出发生磁极溅射的离子入射能量等磁极腐蚀相关参数沿径向的分布。磁极入射离子能量分布函数是通过统计所收集的每一个离子的动能得到的，对落在每个动能区间的离子计数，并进行Gauss函数拟合得到能量分布函数曲线。在磁极表面径向位置r_n处的离子入射能量为

$$E(r_n)=\frac{\sum_{r=r_n}\left[\frac{1}{2}m_i(v_z^2+v_r^2+v_{th}^2)\right]}{k} \tag{2}$$

式中k为位于径向位置$r=r_n$所在网格内收集的磁极表面离子数；m_i为离子质量；v_z,v_r,v_{th}分别为每个离子的轴向、径向和周向速度。离子入射角度的分布函数和径向分布情况采用与入射能量相似的统计和计算方法。

3.2　磁极腐蚀模型

在PIC模拟的基础上，建立磁极表面的溅射腐蚀模型。溅射产额Y受离子入射角度β和入射能量K的影响，表示为

$$Y=f_\beta(\beta)f_K(K) \tag{3}$$

式中$f_K(K)$为离子以0°入射时的能量溅射系数(mm³/C)，$f_\beta(\beta)$为角度溅射系数。

$f_K(K)$的公式根据溅射产额实验数据[21-22]拟合得出，角度溅射系数$f_\beta(\beta)$选用文献中的拟合公式和参数[10,23]，即

$$f_\beta(\beta)=\cos(\beta^{-c_0})\exp[-c_1(\cos(\beta^{-c_2})-1)] \tag{4}$$

$$f_K(K)=A\exp\left[B+C/\left(c_3\ln(K)-c_4\right)^{c_5}+D\exp(c_6K)\right] \tag{5}$$

式中系数A=0.185,B=8.101,C=−38.744,D=0,c_0=2.5204,c_1=0.8552,c_2=1,c_3=4.3429,c_4=9,c_5=0.5,c_6=0。溅射腐蚀模型中的磁极表面离子入射角度β和入射能量K由PIC-MCC仿真结果提供。

4　结果与讨论

4.1　PIC仿真结果

推力器磁极表面产生的腐蚀现象源自于离子的轰击，通过实验能够获得腐蚀的宏观现象，而基于PIC方法的仿真能够提供离子的运动参数并描述磁极腐蚀的特性。

放电通道内的磁力线以及壁面形貌如图3所示，在通道出口处设置倒角。与传统霍尔推力器磁场位型的不同之处是，磁屏蔽设计使磁力线与壁面形貌相匹配。

在该磁场位型、壁面形貌及第3节所述工况条件下，放电通道内靠近出口处的电子和原子数密度分布如图4所示。由图4(a)可以看出，在内外壁面附近电子密度低。由于霍尔推力器放电通道内电子通常会被较强的磁场约束，因此推断壁面附近较低的电子密度与磁场的位型相关。壁面附近的低电子密度使电子与原子之间发生电离碰撞的概率低，如图4(b)所示，形成了虚线标示位置的近壁高原子密度区，并沿着出口倒角延伸到了放电通道之外。

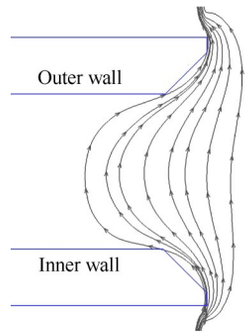


Fig. 3　Streamlines of magnetic field in the channel

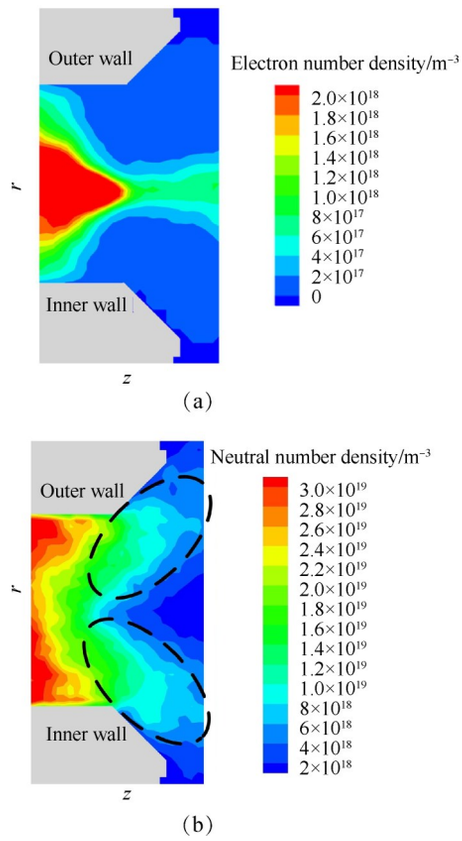


Fig. 4　Contours distributions of electron number density and neutral number density

PIC仿真方法结合溅射腐蚀模型可计算得出磁极表面的腐蚀速率。由图5可以看出(R_{out}为通道外壁直径)，内磁极中心位置的腐蚀速率比径向其他位置高出一个量级；内外磁极的腐蚀速率也有显著差异，内磁极的腐蚀速率比外磁极表面大部分区域高一个量级。图5所描述的磁极腐蚀特点与实验现象基本一致。

由图6中的离子速度流线可以看出，主流离子离开放电通道后继续沿轴向运动，而部分离子会发生径向偏转。径向偏转程度高的离子会运动到磁极表面从而引发腐蚀现象，这部分离子成为主要研究对象。

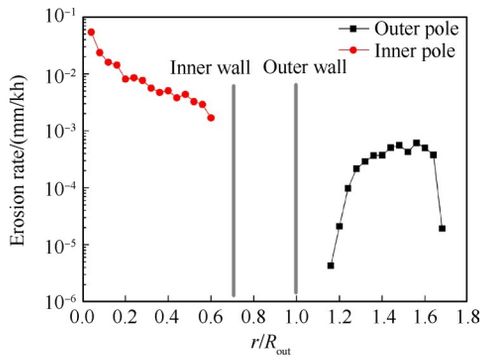


Fig. 5　Erosion rates on the inner and outer pole

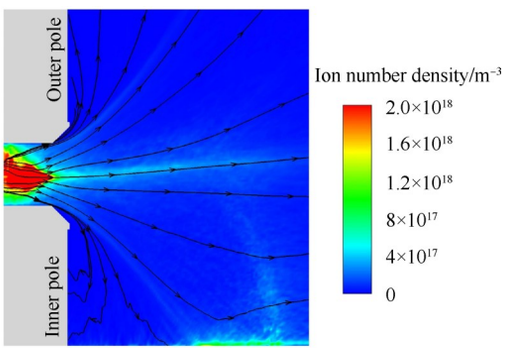


Fig. 6　Ion velocity streamlines overlaid by ion number density

为了解释磁极腐蚀现象产生的机理，需要讨论部分离子向磁极表面运动的原因，追溯发生磁极溅射的离子是如何产生和运动的。为此，在代码中标记电离反应中生成的每一个离子的初始位置。分别将保持轴向加速的主流离子和溅射到磁极表面的离子的初始位置采样提取，绘制分布散点图。如图 7 所示，两种离子的初始生成位置呈现显著的不同：主流离子的初始位置集中在放电通道的中线附近；而最终发生溅射的离子则集中在通道出口靠近壁面倒角处生成。由图 7 可以看出电场线分界的现象，特别是在内磁极附近，电场线被分界面分隔为轴向和径向加速区，发生溅射的离子的初始位置均落在径向加速区。此外，引起磁极腐蚀的离子初始位置的集中区域与图 4(b)中的近壁高原子密度区重合，表明出口处的近壁原子电离后生成离子，由于其轴向位置处于加速区下游，因此成为低速离子；离子生成的径向位置处于放电通道的边缘，会受到电场的作用径向发散，进而偏转直至运动到磁极表面。通道出口处壁面附近电场对离子的作用将在 4.3 节继续讨论。

综上所述，磁极腐蚀现象是由两方面原因引起的。一方面，壁面附近磁场对电子的约束使壁面附近电子密度低，因此原子电离不充分，在壁面附近形成高原子密度区，又由于出口处倒角结构的存在，高原子密度区径向发散使电离产生的离子远离放电通道中线。另一方面，在远离放电通道中线的位置有较大的径向电场力，使离子径向发散并偏转，向磁极方向运动。

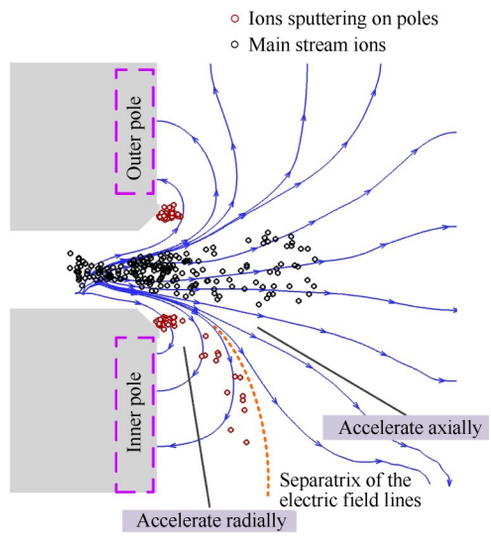
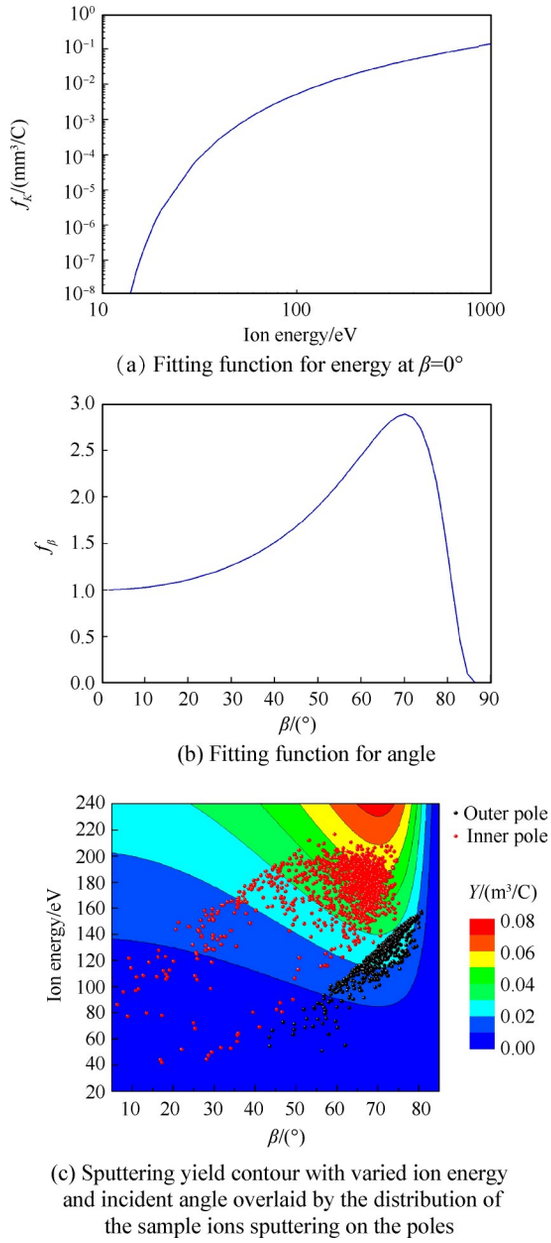


Fig. 7　Initial positions where the main stream ions and the ions sputtering on poles are firstly generated overlaid by electric field lines

4.2　内外磁极腐蚀特性分析

根据公式(3)，溅射产额与离子的入射能量和入射角度有关。由能量溅射系数和角度溅射系数的拟合公式(4)，(5)得出溅射产额随能量和角度的变化曲线以及云图，如图 8 所示。由图 8(a)，(b)可以看出，溅射产额随入射离子能量的增大而增大，存在使溅射产额最大的离子入射角度。PIC 仿真能够收集入射到内、外磁极上的离子运动特性参数。如图 8(c)所示，将收集到的每一个仿真离子的入射能量和角度作为散点绘制在溅射产额的云图上，可以直观地看出内、外磁极上的离子集中在不同的位置，其中内磁极上的离子大多处于溅射产额较高的区域(Y=0.03~0.05m^3/C)。

进一步分析内外磁极腐蚀特性的差异，分别统计入射到内、外磁极上的离子能量、入射角度数据并拟合分布函数曲线。如图 9(a)所示，在内磁极和外磁极上发生溅射的离子能量分布函数曲线峰值所对应的能量分别为 130eV 和 181eV，二者呈现较大的差异。因此，离子入射能量高是内磁极腐蚀速率高于外磁极的原因之一。由图 9(b)可知，内、外磁极入射离子的角度分布函数曲线峰值对应的角度分别为 67°和 73°，根据图 8(b)可知该角度差异对溅射产额



(a) Fitting function for energy at β=0°

(b) Fitting function for angle

(c) Sputtering yield contour with varied ion energy and incident angle overlaid by the distribution of the sample ions sputtering on the poles

Fig. 8　Sputtering yield for xenon ion bombardment on iron

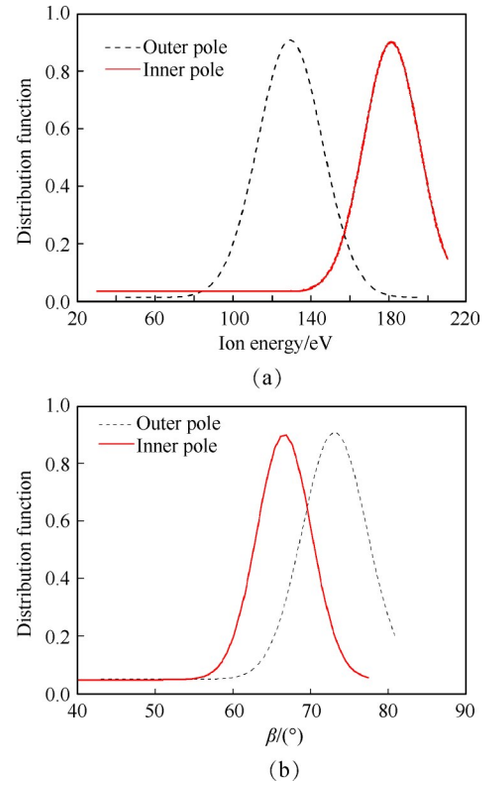


Fig. 9　Energy and incident angle distribution function curves of simulated ions sputtering on the poles

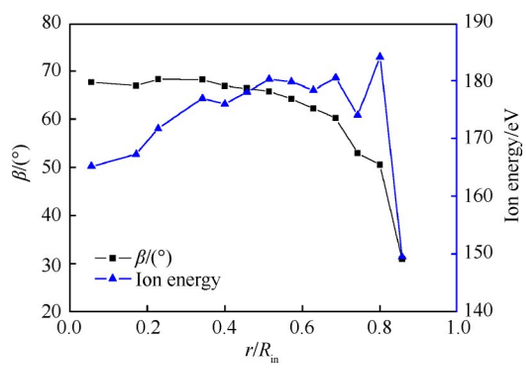


Fig. 10　Radial distribution of the incident angle and energy of ions sputtering at the inner pole

的影响较小。

磁屏蔽霍尔推力器磁极腐蚀现象还具有径向分布不均的特点，内磁极中心区域的腐蚀速率较高。下面分析入射离子特性的径向分布。腐蚀速率主要与溅射产额以及单位面积上入射的离子数量相关，前者的拟合函数仅与入射角度和入射能量相关，后者则可由离子电流密度来表征。由图 5 可知，内磁极中心位置的腐蚀速率比其他径向位置高出一个数量级，而图 10 中内磁极中心位置的离子入射角与周边位置相比变化很小（R_{in} 为通道内壁直径），离子入射能量甚至低于周边径向位置。图 11 所示的离子电流密度径向分布与图 5 中腐蚀速率分布曲线形状相似，离子电流密度在内磁极中心位置达到峰值，表明内磁极中心显著的腐蚀现象主要是由于单位面积上发生溅射的离子数量更多。此外，由图 11 还可以看出内磁极上的离子电流密度远高于外磁极，这是导致内、外磁极腐蚀速率不同的主要原因。

4.3　磁极腐蚀机理分析

通过 4.2 节磁极腐蚀特性的分析可知：(1)内磁极腐蚀速率高于外磁极的原因是内磁极表面离子电流密度高，且入射到内磁极上的离子能量更大；(2)内磁极中心表面腐蚀速率高的主要原因是中心处电流密度大。以上分析结论解释了磁极表面宏观腐蚀现象形成的直接原因，然而，对腐蚀特性的分析还不足以

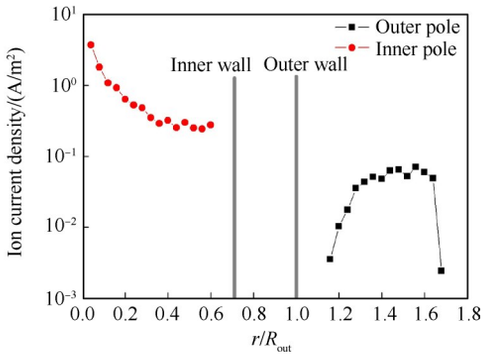


Fig. 11　Radial distribution of the ion current density on the poles

揭示磁极腐蚀的机理。为此，基于以上研究，仍需要进一步探究磁极表面电离密度分布差异的原因。

内、外磁极表面的离子入射能量不同，表明两区域离子具有不同的运动状态和加速过程。由图 6 可以看出，从放电通道至内磁极表面附近的离子速度流线偏转程度相对更大，速度矢量更趋向于指向磁极；而外磁极表面附近的离子速度流线偏转程度相对小，离子不易运动到磁极表面。

霍尔推力器中离子的运动状态主要受到电场力的作用，由图 12 中的电势分布可以看出，磁屏蔽霍尔推力器放电通道出口的电场等势线“凸”向出口外，产生使离子径向发散的电场力，在电场力的作用下离子获得了径向速度；由于羽流中电势高于磁极电势，因此离子在径向发散后，又受到指向磁极表面的电场力。

由图 12(a)中推力器对称轴两侧的电势和电场线可以看出内磁极表面附近的电场呈轴对称分布，对称轴两侧电场力的径向分量均指向中心对称轴，在图中区域内，对称轴两侧的离子均受到指向内磁极中心的电场力，因此磁极中心表面的离子电流密度大。

当内磁极附近的离子在电场力径向分量作用下穿过对称轴(即计算域的下边界)后，离子仍将受到指向对称轴的径向电场力。内磁极附近的离子在轴对称电场的约束下，更易于运动到磁极表面，并且越靠近中心位置，单位径向距离所占表面积越小，因此内磁极表面的离子电流密度相对于外磁极更高。离子穿越对称轴的过程在二维轴对称仿真中通过“镜面反射”来模拟，被反射的离子轴向速度不变，径向速度反向。在图 6 中可以看到内磁极表面附近的离子速度流线不平滑，这便是由于在仿真中，该区域部分离子在对称轴被“镜面反射”后获得了正向的径向速度，而未被反射的离子径向速度多为负值，因此在网格点上统计的离子速度方向不统一，导致流线较为曲折。

相比之下，外磁极所处区域则不涉及推力器的对称轴，如图 12(b)所示，在放电通道内，靠近外壁面的电场线延伸到通道外并指向磁极；而通道内距离外壁面稍远的电场线，其延伸到通道外的部分虽然也具有较大的径向分量，但电场线指向了自由边界，而未向磁极偏转，因此，外磁极附近的部分离子将在径向电场作用下从上边界离开计算域而不引发磁极腐蚀。

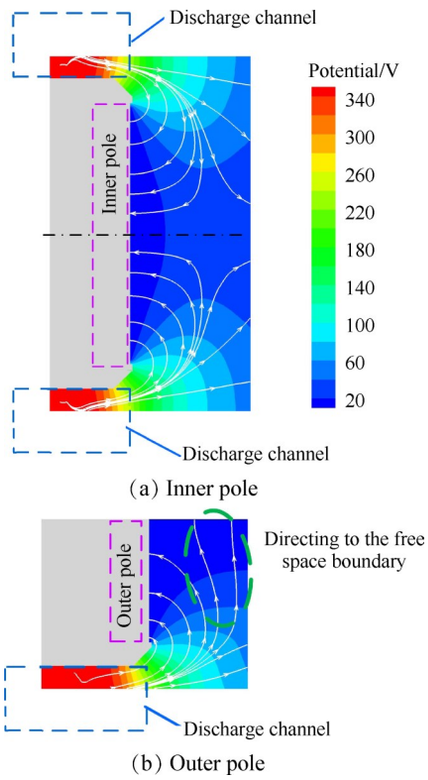


Fig. 12　Potential contour and electric field lines in the vicinity of the magnetic poles

5　结　论

本文基于 PIC-MCC 方法结合溅射腐蚀模型对磁屏蔽霍尔推力器的磁极腐蚀现象、特性和机理进行了仿真研究，得到以下结论：

(1)磁极腐蚀现象是由于在推力器出口倒角附近形成了高原子密度区，原子电离产生的低速离子处于径向电场较大的区域，因此易于径向发散并偏转，向磁极方向运动。

(2)与外磁极相比，内磁极离子电流密度较高，导致内磁极的腐蚀速率比外磁极高一个量级。在内磁极上，中心位置离子电流密度高，使中心腐蚀速率

比径向其他位置高出一个量级。

(3)内磁极尤其是磁极中心处电流密度高的原因是:内磁极附近的离子在轴对称电场的约束下向磁极中心处聚集,该位置承接了环向一周入射的离子,导致磁极中心离子电流密度远大于径向的其他位置。

致 谢:感谢国防基础科研项目的资助。

参考文献

[1] Mikellides I G, Katz I, Hofer R R. Magnetic Shielding of the Acceleration Channel Walls in a Long-Life Hall Thruster [C]. *Nashville*: 46*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2010.

[2] Grys K, Mathers A, Welander B, et al. Demonstration of 10400 Hours of Operation on 4.5kW Qualification Model Hall Thruster[C]. *Nashville*: 46*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2010.

[3] Mikellides I G, Katz I, Hofer R R. Design of a Laboratory Hall Thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase I: Numerical Simulations[C]. *San Diego*: 47*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2011.

[4] Mikellides I G, Katz I, Hofer R R. Magnetic Shielding of Walls from the Unmagnetized Ion Beam in a Hall Thruster [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 023509.

[5] Goebel D M, Jorns B A, Hofer R R, et al. Pole-Piece Interactions with the Plasma in a Magnetically Shielded Hall Thruster[C]. *Cleveland*: 50*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2014.

[6] Mikellides I G, Katz I, Hofer R R, et al. Design of a Laboratory Hall Thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase II: Experiments [C]. *Atlanta*: 48*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2012.

[7] Frieman J D, Kamhawi H, Williams G, et al. Long Duration Wear Test of the NASA HERMeS Hall Thruster [C]. *Cincinnati*: 2018 *Joint Propulsion Conference*, 2018.

[8] Frieman J D, Kamhawi H, Huang W, et al. Wear Test of the 12.5-kW Advanced Electric Propulsion System Engineering Test Unit Hall Thruster [C]. *Virtual Event*: *AIAA Propulsion and Energy* 2020 *Forum*, 2020.

[9] Grimaud L, Mazouffre S. Ion Behavior in Low-Power Magnetically Shielded and Unshielded Hall Thrusters[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, 26: 055020.

[10] Mikellides I G, Ortega A L. Assessment of Pole Erosion in a Magnetically Shielded Hall Thruster[C]. *Cleveland*: 50*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2014.

[11] Ortega A L, Mikellides I G, Chaplin V H. Anomalous Ion Heating and Pole Erosion in the 12.5-kW Hall Effect Rocket with Magnetic Shielding(HERMeS)[C]. *Virtual event*: *AIAA Propulsion and Energy* 2020 *Forum*, 2020.

[12] Ortega A L, Mikellides I G, Sekerak M J, et al. Plasma Simulations in 2-D(r-z) Geometry for the Assessment of Pole Erosion in a Magnetically Shielded Hall Thruster [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125: 033302.

[13] Ding Y J, Wang L, Fan H T, et al. Simulation Rsearch on Magnetic Pole Erosion of Hall Thrusters[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 023520

[14] Frieman J D, Kamhawi H, Mackey J, et al. Completion of the Long Duration Wear Test of the NASA HERMeS Hall Thruster [C]. *Indianapolis*: *AIAA Propulsion and Energy* 2019 *Forum*, 2019.

[15] Frieman J D, Gilland J H, Kamhawi H. Wear Trends of the 12.5kW HERMeS Hall Thruster[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 30: 143303.

[16] Hofer R, Polk J, Sekerak M, et al. The 12.5kW Hall Effect Rocket with Magnetic Shielding(HERMeS) for the Asteroid Redirect Robotic Mission[C]. *Salt Lake City*: 52*nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016.

[17] Liu Q, Tang H, Ren J, et al. Influence of Multiple Factors on Electron Behavior and Transport Process in a Miniaturized Hall Thruster[C]. *Salt Lake City*: 52*nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016.

[18] Allis M K, Gascon N, Cappelli M A, et al. Effect of Charge Exchange on 2D Hall Thruster Simulation [C]. *Princeton*: 29*th International Electric Propulsion Conference*, 2005.

[19] Szabo Jr J J. Fully Kinetic Numerical Modeling of a Plasma Thruster[D]. *Massachusetts*: *Massachusetts Institute of Technology*, 2001.

[20] Hewett W, Larson D J, Dos D. Solution of Simultaneous Partial Differential Equations Using Dynamic ADI: Solution of the Streamlined Darwin Field Equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 101(1): 11-24.

[21] Rosenberg D, Wehner G K. Sputtering Yields for Low Energy He^+-, Kr^+-, and Xe^+-Ion Bombardment [J]. *Journal of Applied Physics*, 1962, 33(5): 1842-1845.

[22] Doerner R P, Whyte D G, Goebel D M. Sputtering Yield Measurements During Low Energy Xenon Plasma Bombardment[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(9): 5816-5823.

[23] Yamamura Y, Shindo S. An Empirical Formula for Angular Dependence of Sputtering Yields[J]. *Radiation Effects*, 1984, 80(1/2): 57-72.

(编辑:朱立影)