

LIPS-300 离子推力器栅极热变形特点实验分析

肖势杰 袁杰红

(国防科技大学空天科学学院,长沙,410073)

摘要:为探究 LIPS-300 离子推力器在工作过程中栅极热变形的规律与特点,设计了大气环境下离子推力器双栅极热变形实验,以一环形加热器模拟实际工作时的等离子体热源。实验研究发现:球面栅极在加热过程中急剧变形,同时屏栅变形量大于加速栅,导致栅极间距减小;在冷却过程中,双栅迅速回复变形,栅极间距同步回复。其次,研究发现栅极中心位移在加热过程中的峰值回落现象,与在冷却过程中的负位移现象,同时发现冷却速率对负位移的大小有着不容忽视的影响。为研究上述现象的起因,对栅极组件的径向位移进行了采集,发现栅极安装环的变形是其根本原因。在结构与温度的综合影响下,栅极安装环的变形相较球面栅极更为缓慢,而其受热膨胀会拉伸球面栅极,导致球面栅极中心拱高减小,中心位移峰值回落。

关键词:离子推力器;热变形;栅极间距;峰值回落;负位移

中图分类号:V19;V43 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2019)S-0013-05

Analysis of Thermal Deformation Characteristics of LIPS-300 Ion Thruster Grid

XIAO Shijie, YUAN Jiehong

(College of Aerospace Science Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of the thermal deformation of the LIPS-300 ion thruster in the working process, a double grid thermal deformation experiment is designed for the ion thruster in the atmosphere, and a loop heater is used to simulate the plasma heat source. It is observed that the spherical grid deforms sharply during the heating process, and the deformation of the screen grid is larger than that of the accelerator grid, which results in the decrease of the grid gap, while during the cooling process, the double grid rapidly recovers and the grid gap increases rapidly. Secondly, the peak drop of the center displacement of the grid in the heating process and the negative displacement in the cooling process are observed. At the same time, it is found that the cooling rate has an important influence on the magnitude of the negative displacement. In order to study the causes of the above phenomenon, the radial displacement of the grid assembly is collected, and the deformation of the grid mounting ring is found to be the fundamental cause. Under the influence of the structure and temperature, the deformation of the grid mounting ring is slower than that of the spherical grid, and its thermal expansion will stretch the spherical grid, resulting in the peak drop of the spherical grid center displacement.

Key words: ion thruster; thermal deformation; grid gap; peak drop; negative displacement

LIPS-300 离子推力器的栅极组件为三栅极结构,由 3 片薄壁、多孔、壳体结构的球面栅组成,栅极与栅极之间通过栅极安装环固定连接,栅极组件的材质均为纯钨材料。工作时,放电室内的等离子

收稿日期:2019-04-09;**修订日期:**2019-06-20

通信作者:袁杰红,男,教授,E-mail:yuanjiehong@nudt.edu.cn。

引用格式:肖势杰,袁杰红. LIPS-300 离子推力器栅极热变形特点实验分析[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(增刊):13-17. XIAO Shijie, YUAN Jiehong. Analysis of Thermal Deformation Characteristics of LIPS-300 Ion Thruster Grid [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 13-17.

体会向栅极辐射能量,同时屏栅筒的热量会传导至栅极组件,致其受热膨胀^[1]。另外,在栅极组件对离子束流聚焦效应作用下,束流密度呈现出中心高、在边缘低的现象,导致栅极中心温度高、边缘温度低,温度场沿栅极径向对称,近似成二次曲线分布^[2-3](屏栅中心温度可达400~500℃,边缘温度比中心低100~300℃^[4])。所以,离子推力器工作时,栅极中心处将会产生最大热变形^[5]。同时,屏栅温度变化最为明显,在短时间内变形非常迅速且变形量大,使得屏栅与加速栅的间距急剧缩小^[6]。此外屏栅、加速栅、减速栅中心温度依次降低^[7],导致其变形量也依次降低,栅极间距减小。栅极间距减小将影响离子束流的发散角、推力大小,增大电子返流阈值、加重栅极腐蚀^[8-10],更严重的是会增大栅极打火概率,甚至接触短路导致推力器关机^[11-12]。

为了对栅极组件热变形特点与规律进行分析,国内外已经开展过一系列研究,国外格伦研究中心的Soulas^[13]对NSTAR离子推力器上的30 cm钛制栅极组件进行了研究,将氧化铝制探针通过螺栓机械地固定在屏栅表面,并通过远距显微镜与数字图像处理技术记录探针位移和加速栅下游位移。俄罗斯学者Fedorov^[14]提出了一种栅极热变形的理论计算方法,研究了不同栅极形状、不同材料、不同半径温度梯度对栅极热变形的影响。国内孙明明^[1]建立了LIPS-300离子推力器有限元分析热特性模型,在后续研究中^[15],对栅极力学性能参数进行等效,建立了栅极的等效无孔平板模型,仿真计算了栅极边缘有约束和无约束两种情况下的栅极热变形,并对30 cm离子推力器三栅极组件随工作时间变化导致的热变形位移进行了模拟计算。综合国内外研究成果,发现现有研究均只针对球面栅极本身进行热分析,缺乏对离子推力器栅极组件热变形机理及特点的深入分析。因此为深入探究栅极组件热变形有关机理,本文利用了课题组自行研发的一套栅极热间距测量系统,在大气环境下进行了栅极变形的实验测量,对栅极热变形的规律与特点进行了研究分析。

1 栅极组件实验

1.1 实验系统

本文所采用的实验系统由热源、栅极组件、视觉测量系统3部分组成。其中,热源为4.5 kW的环形加热器,用来模拟离子推力器正常工作时产生于放电室内的等离子体热源;栅极组件为屏栅与加速栅组成的双栅极组件;视觉测量系统为课题组基于摄像测量技术自行开发的非接触式测量系统,

测量精度可达9 μm;将探针与合作标志固定在栅极中心,如图1所示,所测得探针的伸长量即为栅极中心点的热变形。整套大气环境实验系统搭建如图2所示。

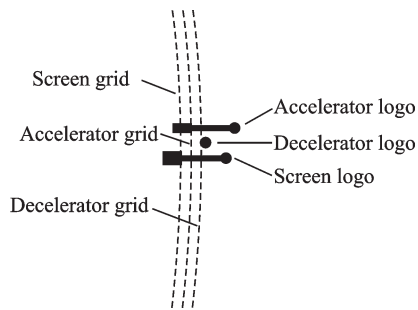


图1 探针安装

Fig. 1 Installation of pin

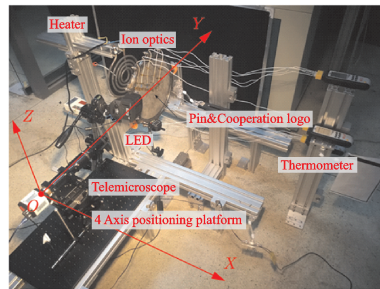


图2 大气环境实验系统

Fig. 2 Experimental system under atmospheric environment

1.2 大气环境实验

考虑到离子推力器实际工作过程可分为开机阶段、稳定工作阶段、关机阶段3部分,所以在大气环境实验中同样设置了加载、稳定加载、卸载3个阶段来一一对应。同时,考虑到大气环境下由于空气对流换热影响,相比真空环境散热与温降更快,在卸载过程中会对球面栅极的变形回复产生一定影响,于是设计了两组采取不同卸载速率的实验来研究其对球面栅极变形的影响,实验流程如图3所示。实验中不仅对屏栅与加速栅的中心位移进行了采集,而且利用专业热电偶测温仪(温度范围-200~1 372℃,温度精度0.15%rgd+1℃,分辨率0.1℃)对栅极表面温度场进行了采集,在栅极表面沿半径方向每隔3.75 cm布置一测点,屏栅与加速栅各5个,如图4所示,可以获取整个实验过程中的栅极组件温度变化,以进一步分析温度场对栅极变形的影响。

为检验环形加热器模拟等离子体热源的效果,对栅极表面的稳态温度场进行拟合,得到图5近似的二次曲线,便认为球面栅极表面温度场特性与实际工作条件较为符合。实验过程中的动态温度曲线如图6,7所示,可见双栅在加载过程中迅速升温

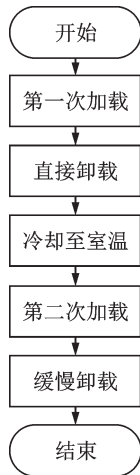


图3 实验流程

Fig. 3 Process of experiment

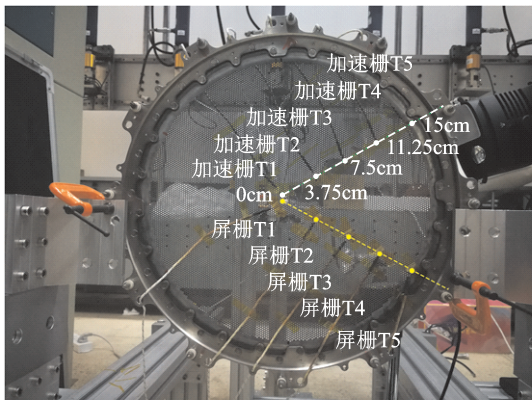


图4 温度采集

Fig. 4 Temperature collection

并达到峰值,其中屏栅较加速栅升温更快,峰值更高,各栅极峰值温度整理如表1所示。在卸载过程中,双栅迅速降温并缓慢冷却至室温。这是由于双栅极的层叠结构,屏栅对加速栅有着辐射遮挡的作用,热量难以直接辐射至加速栅表面,主要通过屏栅间接辐射与安装环间接传导至加速栅,使其升温。其次屏栅开孔率高达69%,其热容量要小于加速栅,保持温度的能力最差,温度改变速率更快。所以在热容量、栅极层叠结构等多因素的综合影响下,屏栅较加速栅温度变化率更大,峰值更高。

其次,实验过程中双栅在加载过程中,中心采样点升温最快,峰值最高,但在卸载过程后期却低于边缘采样点温度,其温差变化如图8所示。这是因为卸载过程中,栅极组件主要通过与空气对流换热来实现降温,单位时间内空气对流换热热量根据牛顿冷却定律计算

$$\Phi = hA(T_w - T_f) \quad (1)$$

式中: Φ 为换热量(W), h 为对流换热系数(W/(m²·K)), A 为换热表面面积(m²), T_w 为固体表面温度(°C或K), T_f 为流体温度(°C或K)。

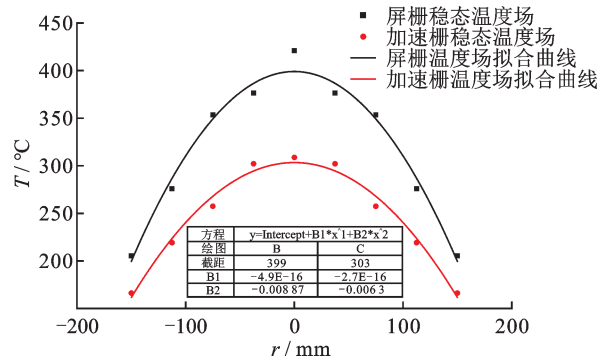


图5 栅极稳态温度场拟合

Fig. 5 Grids' steady-state temperature field fitting

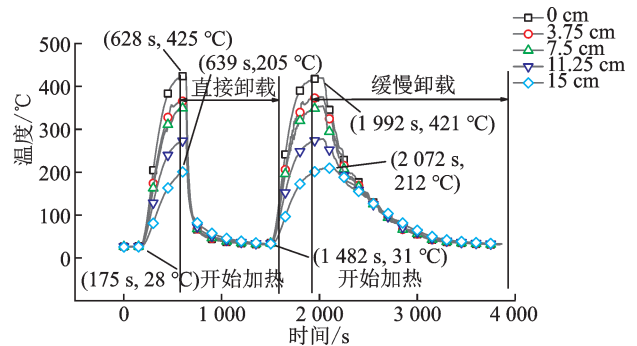


图6 屏栅温度曲线

Fig. 6 Temperature curve of screen grid

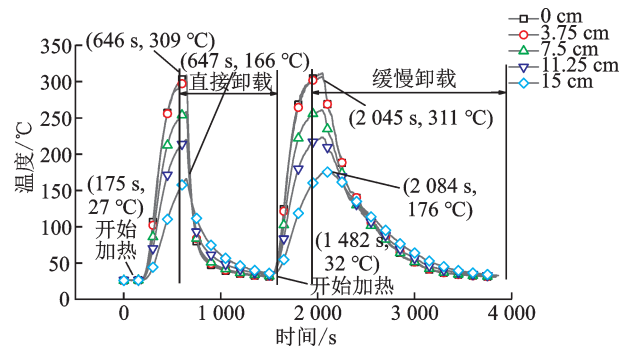


图7 加速栅温度曲线

Fig. 7 Temperature curve of accelerator grid

表1 双栅中心温度峰值

Tab.1 Central temperature peak coordinates of double grid

加载	屏栅	加速栅
第一次加载	628 s, 425 °C	646 s, 309 °C
第二次加载	1 992 s, 421 °C	2 045 s, 311 °C

由于球面栅极中心位置温度更高,所以在单位时间内的换热量要高于栅极边缘位置,导致温度下降更快,并在卸载后期低于栅极边缘位置。

在温度场的作用下,栅极组件开始变形,球面栅极的中心位移与栅极间距变化曲线如图9,10所示,可见双栅在实验过程中由于升温急剧变形,中心位移迅速增大至极值后出现小幅度回落,栅极间

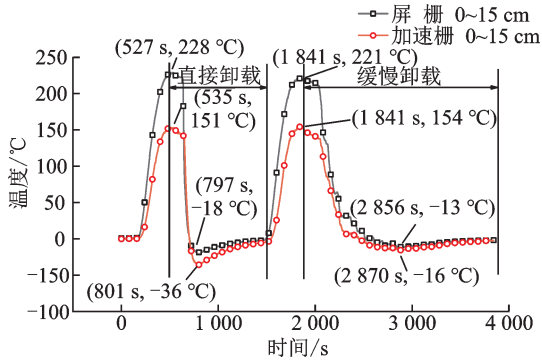


图8 大气实验栅极温度差

Fig. 8 Grid temperature difference of experiment under atmospheric environment

距急剧缩小。待栅极温度达到稳态一定时间后开始卸载,双栅中心位移伴随温度的下降迅速减小并达到负值,最后缓慢归零。其中,缓慢卸载相比直接卸载,负位移明显减小,证明了卸载速率对栅极的变形回复存在影响。整理实验过程中双栅的中心位移与间距变化得到表2,两次实验的双栅稳态间距变化 $-448\ \mu\text{m}$ 和 $-467\ \mu\text{m}$ 。

结合以往Rawlin针对栅极组件变形规律提出的猜想^[16],栅极组件在工作过程中,栅极安装环的膨胀变形会拉伸球面栅极导致其中心拱高减小,因此卸载过程中栅极中心位移呈现了负值。但缓慢卸载由于对球面栅极与栅极安装环在卸载过程中仍有加热,减缓了栅极的变形回复速率,所以其相较直接卸载,负位移现象要为缓和。

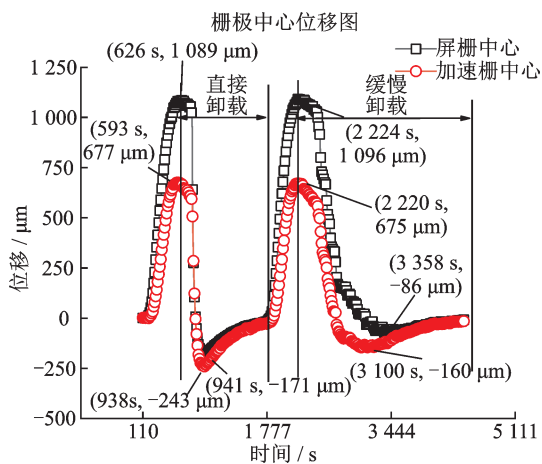


图9 栅极中心位移变化曲线

Fig. 9 The central displacement variation curve of grid

表2 栅极中心位移

Tab. 2 Grid center displacement

位移/ μm	屏栅		加速栅		间距变化
	最大位移	最小位移	最大位移	最小位移	
直接卸载	1089	-171	684	-243	-448
缓慢卸载	1096	-86	675	-160	-467

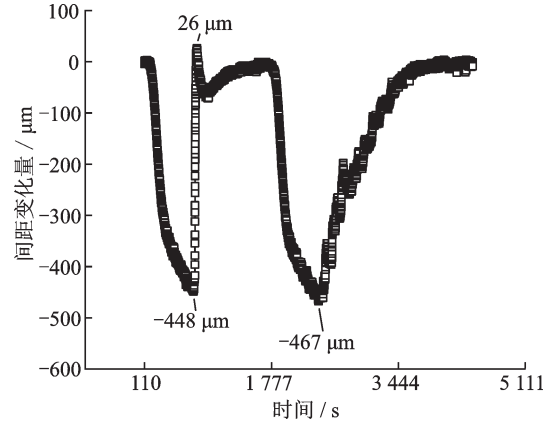


图10 屏-加速栅间距变化曲线

Fig. 10 The variation curve of grid gap between screen grid and accelerator grid

1.3 栅极组件径向位移检测

为进一步验证推想,确定球面栅极是否因拉伸而存在径向位移导致中心拱高减小,调整了大气环境的实验系统,将远距显微镜位置调整至垂直于栅极切向,用以采集栅极的径向位移,见图11,得到了栅极安装环采样点和栅极边缘采样点的位移数据,见图12。

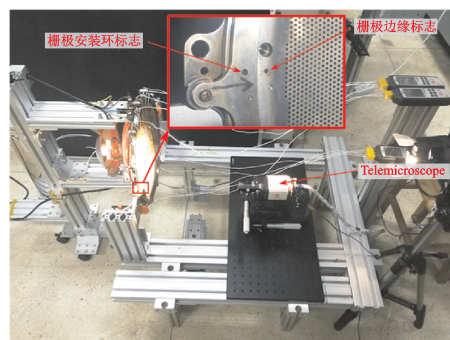


图11 栅极径向位移采集

Fig. 11 Grid radial displacement collection

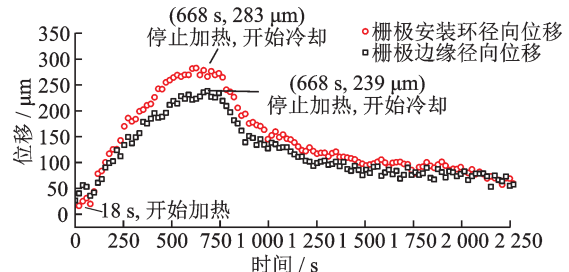


图12 径向位移检测

Fig. 12 Radial displacement detection

通过图12显然易知,栅极安装环和栅极边缘部分均出现了径向位移,且安装环位移大于栅极边缘,对其产生拉伸作用。而这种径向位移便是导致球面栅极拱高减小的直接原因,通过该实验,已足以解释大气实验中出现的栅极峰值回落与负位移

现象,正是由于栅极安装环的受热膨胀对球面栅极的拉伸作用而引起。

2 结 论

本文基于课题组研发的栅极热间距测量系统,在大气环境中进行了实验,对栅极组件的热变形特点进行了研究与分析。结论如下:

(1)栅极组件边缘固定约束情况下,热变形位移无法释放,球面栅极整体变形,其一阶热变形固定为沿球半径向外突出。

(2)栅极组件在受热后变形急剧并趋于稳定,而由于栅极组件的层叠结构、热容量等多种因素的综合影响,屏栅的变形要比加速栅快,且变形量更大,这是栅极间距缩小的直接原因。

(3)球面栅极的中心位移在两次实验过程中均出现了峰值回落与负位移现象,但程度显著不同。这是由于栅极组件中的栅极安装环变形拉伸了球面栅极,导致其存在径向位移而中心拱高减小,而在缓慢卸载过程中,热源对栅极组件存在持续加载,球面栅极的变形回复得以减缓,安装环对球面栅极的拉伸程度降低,故负位移现象较为缓和。

参考文献:

- [1] 孙明明,张天平,王亮,等. 30 cm离子推力器栅极组件热应力及热形变计算模拟[J]. 推进技术, 2016(7):1393-1400.
SUN Mingming, ZHANG Tianping, WANG Liang, et al. Thermal stress and thermal deformation analysis of grids assembly for 30 cm diameter ion thruster[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016(7): 1393-1400.
- [2] RAWLIN V, BANKS B, BYERS D. Design, fabrication, and operation of dished accelerator grids on a 30-cm ion thruster [C]//AIAA 9th Electric Propulsion Conference.[S.l.]:AIAA,1972.
- [3] BUNDESMANN C, TARTZ M, SCHOLZE F, et al. In situ thermal characterization of the accelerator grid of an ion thruster[J]. Journal of Propulsion and Power, 2011,27(3):532-537.
- [4] KAUFMAN H R. Technology of electron - bombardment ion thrusters [J]. Advances in Electronics & Electron, 1975(36):265-373.
- [5] SOULAS G C, FRANDINA M. Ion engine grid gap measurements [J]. AIAA Journal, 2004: 10.2514/6.2004-3961.
- [6] DIAZ E M, SOULAS G C. Grid gap measurement for an NSTAR ion thruster [C]//Princeton: 29th International Electric Propulsion Conference.[S.l.]:[s. n.], 2005.
- [7] HAYAKAWA Y, YOSHIDA H, MIYAZAKI K, et al. Thermo-elastic analyses of ion-thruster grids[C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S.l.]:AIAA,2009.
- [8] 陈茂林,夏广庆,徐宗琦,等. 栅极热变形离子推力器工作过程影响分析[J]. 物理学报, 2015, 64(9): 283-289.
CHEN Maolin, XIA Guangqing, XU Zongqi, et al. Analysis on the effects of optics thermal deformation on the ion thruster operation[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(9): 283-289.
- [9] WIRZ R, KATZ I, DAN G, et al. Electron backstreaming determination for ion thrusters [C]//Hartford: 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [S.l.]:AIAA, 2008.
- [10] FARNELL C C. Performance and lifetime simulation of ion thruster optics [D]. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 2007.
- [11] VAN NOORD J L. Lifetime assessment of the NEXT ion thruster [C]// Cincinnati: 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S.l.]:AIAA, 2007.
- [12] GEORGE C, SOULAS R S. Post-test inspection of NASA's evolutionary xenon thruster long duration test hardware: ion optics[C]// 52nd AIAA/SAE/AS-EE Joint Propulsion Conference. Salt Lake City: [s. n.],2016.
- [13] SOULAS G, FRANDINA M. Ion engine grid gap measurements[C]//40th Joint Propulsion Conference and Exhibit cosponsored by the AIAA, ASME, SAE, and ASEE Fort Lauderdale. Florida: [s. n.], 2004.
- [14] FEDOROV V A, MOGULKIN A I, OBUKHOV V A, et al. Numerical simulation of temperature deformation for radio frequency ion thruster electrodes [J]. Procedia Engineering, 2017, 185:24-30.
- [15] 孙明明,张天平,贾艳辉. 30 cm离子推力器栅极组件热形变位移分析研究[J]. 真空与低温, 2017, 23(6):349-354.
SUN Mingming, ZHANG Tianping, JIA Yanhui. The thermal deformation displacement analysis of the grids for a 30 cm diameter ion thruster[J]. Vacuum & Cryogenics, 2017,23(6):349-354.
- [16] RAWLINS V K, BANKS B A, BYERS D C. Dished accelerator grids on a 30-cm ion thruster[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 1973,10(1):29-35.