30 cm离子推力器栅极组件热形变位移分析研究

孙明明,张天平,贾艳辉

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室,兰州 730000)

摘要:栅极组件是影响离子推力器束流加速引出的核心部件,其在工作过程中随着热量累积形成的热形变位移 是影响工作性能的关键因素。采用有限元分析方法对30 cm离子推力器三栅极组件随工作时间变化导致的热形变 位移进行了模拟,重点对栅极间距变化过程进行了模拟计算,并对单个栅极达到温度平衡的时间进行了模拟,预估了 三栅极组件的冷态启动时间,并对栅极组件在工作期间内随温度变化造成的打火风险进行了预估。

关键词:离子推力器;栅极组件;热形变位移

中图分类号:V439.4 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2017.06.008 文章编号:1006-7086(2017)06-0349-06

THE THERMAL DEFORMATION DISPLACEMENT ANALYSIS OF THE GRIDS FOR A 30 cm DIAMETER ION THRUSTER

SUN Ming-ming, ZHANG Tian-ping, JIA Yan-hui (Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The grids assembly is the key component which influences the ion beam acceleration and extraction of ion thruster, and the thermal deformation displacement caused by heat accumulation during work process, which will influence the performance of ion thruster. FEM (Finite Element Method) is used in this paper to simulate the thermal deformation displacement variation of three-grids assembly with working time. Focusing on distance change is calculated and the temperature balance time is simulated. Warm-up time of the grids and the risk of short circut of the grids with time variation are estimated in this paper.

Key words: ion thruster; girds; thermal deformation

0 引言

30 cm离子推力器是我国针对新一代大型桁架 式卫星平台所研制的高功率、大推力离子推力器^{III}, 并设计了新结构三栅极组件以作为离子推力器等 离子体束流的加速和引出装置。由于在工作过程 中,栅极组件随能量沉积效应温度会迅速提高,并 且由于温度累积造成的栅极热形变位移,会直接造 成推力器栅极间的打火短路现象,对于离子推力器 和PPU的寿命及可靠性均会造成严重影响。

美国在对NSTAR离子推力器的长期研究中,认 为离子推力器的在轨服务寿命主要是由推力器栅 极组件或是由加速极所决定的,并且推力器的冷态 启动时间同样由栅极决定^[2]。栅极组件的设计参数 如栅极导流系数以及加速电压会直接影响离子加 速过程的特性参数,并且栅间距变化会影响到推力 器可靠性及服务寿命(根据NSTAR离子推力器的试 验结果来看,当栅极间距降低至0.2 mm以下,栅间 打火短路频次会显著提高)。由于栅间距是在推力 器设计完成后,以固定形式在推力器上进行安装, 工作过程中由于不同温差形成的屏栅和加速栅的 热膨胀会造成栅间距的变化,并且若栅极组件采用 金属材料,热膨胀效应会使得栅间距变化更为明 显,从而导致推力器出现离子束流聚焦性能变差, 电荷交换离子对栅极的轰击溅射概率提高等一系列

收稿日期:2017-07-21

基金项目:真空低温技术与物理重点实验室基金(6142207030103)

作者简介:孙明明(1985-),男,陕西咸阳人,博士,高级工程师,主要从事空间电推进技术研究。E-mail:smmhappy@163.com。

不利因素,因此对于自冷态启动的栅极间距变化量, 可以用于评估栅极工作性能参数以及服务寿命^[2]。

2002年,美国NASA在对NSTAR离子推力器的 冷态启动试验中,将推力器功率设置为2.3 kW (NSTAR的满功率),并计划在1 min内实现放电点 火启动,但试验发现加速栅和屏栅在5 min内,束流 引出中心区域发生多次打火短路^[3]。通过描绘推力 器冷态启动过程中的栅间距瞬态位移变化曲线,发 现由于热量累积对栅极造成的热冲击效应,使得屏 栅热形变位移远大于加速栅,并且屏栅由于开孔率 较高(69%),热容量远小于加速栅,导致屏栅温度变 化在前1 min内非常迅速,从而造成大的热形变位 移,使得加速栅和屏栅间距急剧缩小,发生双栅间 的接触短路现象。

对我国首次研制的三栅极组件开展瞬态热形 变位移分析,由于三栅极组件相比双栅极组件结构 更为复杂,并且采用数值求解难度较高,因此采用 有限元分析方法(FEM)对三栅极组件开展分析,并 提出抑制冷态启动短路问题的相关建议和措施。

1 有限元分析模型

为了完成三栅极组件非均匀温度场下的瞬态 结构微小位移仿真,首先需建立有限元分析模型。 针对栅极组件薄壁、多孔、壳体的特殊结构微位移 仿真,模型结构非常复杂,因此对模型需进行相关 的简化处理以实现网格顺利划分的目的,模型简化 处理原则:

(1)删除栅极原有多孔特征,进行均匀化处理, 但保留1:1拱高高度不变;

(2)对影响网格划分的表面凸起、硬边、带缺陷 圆孔等,均采用布尔操作进行修复或填补;

(3)对于约束部件(主要是标准件),在不改变 约束面的基础上,进行简化处理,使得约束条件与 真实情况基本一致;

(4)对于其余部件,均予以保留,且保留其特征。

简化后的三栅极组件有限元分析模型如图1所 示,标准件的简化如图2所示。



图 1 三栅极组件原始模型及简化后模型图 Fig.1 Original model and simplified model of the grids assembly



图 2 标准件的简化处理图 Fig.2 Standard bolts' structure simplification

2 材料属性设置

由于有限元分析模型采用的是等效处理方法, 即将原有多孔带弧度栅极的结构特征等效为无孔 带弧度栅极,因此对于屏栅、加速和减速三个栅极 的材料力学属性均需进行等效处理,等效的同时需 充分考虑拱高影响,等效方法参考了栅极结构力学 属性的等效方法^[4]。其中等效结构的 y 方向弹性模 量如式(1)所示。式中 E 为栅极材料的真实弹性模量 (约320 GPa), l 为单个栅孔的外径, r 为圆环内径。

$$E_{y} = \sigma_{y} / \varepsilon_{y} = 8E \frac{l-r}{\pi(l+r)}$$
(1)

其次假设等效模型材料属性是各项同性的,因此栅极的等效弹性模量 *E*_{eff} 如式(2)所示。

$$E_{\rm eff} = E_x = E_y \tag{2}$$

由于等效过程是将原有多孔结构处理为平板 无孔结构,因此等效后的栅极组件密度与开孔率相 关。美国 Meckel 对 HiPEP 离子推力器栅极组件密 度等效处理,是将栅极组件原有材料密度 ρ ,在考 虑栅极组件的开孔率 R_A 后,采用等效密度 ρ_{eff} 来替 换^[5],如式(3)。

$$\rho_{\rm eff} = (1 - R_{\rm A})\rho \tag{3}$$

代入相关参数后,得到30 cm离子推力器栅极 组件等效后的材料力学特性如表1所列。

	diameter ion thruster	
Table1	The grids' effective mechanical property of 30 c	m
表1	30 cm离子推力器栅极组件等效后的材料力学特性	£

部件	材料	几何透 明度	等效密度/ (kg•m ⁻³)	等效弹性 模量/GPa
屏栅	Mo-01	0.69	2 973.00	20.79
加速栅	Mo-01	0.27	7 001.00	89.43
减速栅	Mo-01	0.48	4 684.75	45.32

对于材料的热导率、表面发射系数、热膨胀系 数等参数根据相关试验数据设定,并且对于有限元 模型中的所有标准件均统一设置为TC-4材料,材 料热力学属性同样按TC-4设置。

3 网格划分及接触对设置

为保证网格的顺利划分,因此对不同部件采用 不同网格划分方法,其中简化后的标准件采用体扫 略法划分,栅极部件采用三角形实体单元,并通过 控制其边缘尺寸进行划分,对于栅极安装环则控制 其高度进行划分,模型划分结果如图3所示。





不同部件之间的接触关系对传热过程和力学 分析具有重要影响,对模型约100个接触对均进行 了指定,删除了由于模型自动生成的错误接触对, 以保证结果的准确性,并且对各个部件间的接触热 阻均进行了忽略,主要由于无法获得确定的接触热 阻大小。

4 边界条件设置

三栅极组件非均匀温度场下的微小结构位移 仿真分析边界条件主要包括:温度场分布边界条件 及力学约束边界条件,各边界的设置为:

(1)热通量

根据环形会切磁场离子推力器热模型^[6],以计 算得到的30 cm离子推力器能量沉积分布结果进行 栅极热边界设置,并且以热通量形式给出。由于本 次分析为三栅结构,并且从前期试验结果来看,离 子造成的加速截获和减速截获电流非常小,因此对 减速栅和加速栅未加载沉积能量,而设置屏栅的面 热流通量为2116.8 W/m²。

(2)环境温度

对于三栅极组件有限元分析的外界环境温度 设置,则是以推力器在轨或热真空试验的启动环境 温度为依据,因此设置环境背景温度为-70℃。 (3)辐射面对

根据三栅极组件的实际辐射关系,分别设置屏栅外表面-加速内表面、加速外表面-减速内表面、减速外表面-环境,共3个辐射面对,其中屏栅外表面-加速内表面的辐射面对如图4所示。





(4)时间步长设置

三栅极组件的时间-温度变化以推力器实际工 作过程为依据,由于推力器在轨单次工作时间要求 一般在3h以内,因此求解时长设置为0.1~10800s 计算范围,并且时间迭代步长设置为随迭代次数的 增加而增加,以减少运算时间。

(5)固定约束设置

推力器栅极组件与推力器进行固定装配,因此 将上极靴部件作为固定约束部件,固定约束部位如 图5所示。



图 5 三栅极组件固定约束设置图 Fig.5 Fixed support of the grids assembly

(6)微位移模拟时间步长设置

求解时长为0.1~10 800 s计算范围,将随时间 变化的温度分布结果直接导入瞬态位移分析过程, 并根据求解时间,将计算范围等分为6个区间,迭代 步长根据6个区间的时间范围进行分别设置。

5 时间-温度场分布及结构位移分析结果

完成边界条件设置后,计算得到不同栅极的温 度变化曲线如图6(a)所示,10800 s后的栅极整体 温度分布图6(b)所示。可以看出,不同栅极的温度 变化程度差距非常大,其中屏栅温度在0.1~108 s内 从-70 ℃变化至104 ℃, 而加速栅温度在0.1~108 s 内从-70℃变化至-53℃,减速栅温度变化最小,在 0.1~108 s的范围内仅从-70 ℃变为-65 ℃。主要原 因是由于屏栅直接受到放电室等离子体的辐射效 应以及屏栅筒的温度传导效应,其次屏栅开孔率相 比加速栅和减速栅最高,开孔率达到69%,因此热 容量最小,当受到热冲击作用时,其温度保持能力 最差即温度变化最为明显四。而加速栅处在屏栅和 减速栅中间,受到的等离子体辐射效应相对屏栅减 弱许多,且温度传导升温效应是在屏栅支撑环已经 达到一定温度的基础上才会明显发生。而减速栅 由于在最外侧,几乎不会受到等离子体辐射影响, 目温度传导效应最为缓慢,并且由于存在减速栅对 空间环境的能量辐射效应,因此推力器工作前期的 减速栅温度变化最为缓慢。

随着工作时间的增大,三个栅极的温度均会发 生明显升高,且不同栅极达到的平衡温度也不同, 其中屏栅平衡温度最高,达到了约400℃,而加速栅 平衡温度在320~330℃范围内,减速栅平衡温度约 为210℃,结果如图6(b)所示。其次根据航天器组 件的热试验要求,航天器用部组件的热平衡条件为 在1 h内温度变化小于1℃,因此栅极组件在3 h 内未达到热平衡状态,将仿真计算时间推广至10 h 后,根据时间-温度变化曲线来看,栅极达到热平 衡状态的时间为4~4.5 h范围,与热试验结果基本 一致。

根据分析结果可以看出,三个栅极的温度变化 速率明显不同,且平衡温度差异较大,因此会造成 三个栅极的形变存在明显的差异性。对于离子推 力器来说,不同栅极的温度差异性是不可避免的, 这主要是由于栅极的结构特点所引起,因此主要考 虑如何在离子推力器工作前期,抑制由于温度快速 变化的差异性引起过快结构位移导致的推力器打 火及电源短路现象。



图 6 栅极温度变化曲线及 10 800 s 后的栅极温度分布图 Fig.6 Temperature variation curve and temperature distribution after 10 800 s of the grids

由于三个栅极均为边缘固定约束,因此主要的 形变方向为Z方向形变(垂直栅极表面,且形变方向 为等离子体束流喷口方向),图7(a)为三个栅极的Z 方向结构热形变位移变化,图7(b)分别为屏栅与加 速栅的Z方向相对位移,以及加速栅和减速栅的Z 方向相对位移。

从图7(a)的仿真分析结果可看出,屏栅由于温度最高,因此热形变位移随时间变化最为明显,从200~1800 s期间内,屏栅的热形变位移变化至约1.8 mm,而同样在此时间段内,加速栅的热形变位移约为1.2 mm,减速栅由于温度分布较低且分布较为均匀,热形变位移仅约0.5 mm。从图7(b)的仿真分析结果可看出,在2000~7000 s的时间段内,无论是屏栅和加速栅或是加速栅和减速栅,栅极间距均处于下降趋势,自7000~10800 s时间段内,不同栅极间的相对距离又在逐渐增大,因此提高了打火短路风险,出现如图7(b)的结果,主要是由于栅极

的温度平衡过程所导致。





从图7仿真结果可看出,在离子推力器的冷态 启动过程中,由于屏栅和加速栅之间的冷态间距仅 有约0.9 mm,在前200~2 000 s的时间范围内,屏栅 的快速升温所引起的较大热形变位移,会导致屏栅 与加速栅的间距急剧缩小,若在屏栅和加速栅之间 存在金属多余物,则会导致屏栅和加速栅之间的电 源短路保护发生概率增大。从2 000~7 000 s的时 间段内,由于三栅极之间的相对位移变化在逐渐降 低,因此在此期间内会出现一段稳定期,此期间三栅 极之间的打火现象会相对降低。从7 000~10 800 s 的时间段内,由于三栅极温度分布的进一步变化, 尤其是减速栅温度的上升,造成三栅极之间的相对 位移变化在逐渐升高,并且由于加速栅和减速栅的 栅间距相对较小,因此在此阶段加速栅和减速栅之 间的打火短路现象发生概率更高。

栅极打火现象是多种因素共同影响造成,主要 是栅极间的状态发生了变化,包括如栅极热态间距 变化、热膨胀导致的栅孔错位、离子束流引出性能 变化、栅极间多余物或是整体结构引起的电场变化 等多种复杂因素。通过试验过程中的电源保护统 计频次来看,加速栅和屏栅间打火是栅极打火现象 的主要发生概率事件,并且由于屏栅极中心区域热 形变位移最大,在温度平衡状态下的加速栅和屏栅 间的最大相对位移变化达到约0.8 mm,因此预计加 速栅和屏栅间的打火现象主要发生在中心区域,如 图8所示。





6 结论及建议

根据分析结果来看,在整个启动过程中,屏栅 和加速栅之间的间距是在逐渐减小并持续变化,最 小栅极间距出现在3600~4000 s区间,栅间距最小 变化至0.2 mm,但二者不会发生接触。而加速栅和 减速栅之间的间距在3600 s以前,是先减小后增加 的,在3600 s后,加速栅和减速栅间距甚至会缩减 为0 mm,发生接触短路,但在4000 s后,加速栅和 减速栅间距会逐渐拉大。 文章所给出的栅极热形变位移分析结果为最 恶劣情况,实际工作情况应小于分析结果,并且三 栅极随着工作时间的变化存在着诸多复杂影响因 素,包括空间环境温度影响,材料表面发射系数,接触 面状态等。但从分析结果的趋势来看,在前2000 s 时间范围内,屏栅和加速栅之间的电源短路保护发 生概率较高,而在后期7000~10800 s的时间段内, 加速栅和减速栅之间的电源短路保护发生概率较 高,而造成上述现象的主要原因即不同栅极上的温 度分布变化情况,从热应力产生的机理来看,保持 较为均匀的温度分布以及降低不同部件之间的温 度差是最为理想的降低热应力及热形变位移危害 的措施。

因此建议在30 cm离子推力器的工作启动过程 中,在前2000 s时间范围内,考虑到屏栅的热容小, 温度上升明显等因素,可以缓慢的提升屏栅电压以降 低离子加速能量,同时对阳极电流采用逐步加载方 式,以减小栅极的离子沉积能量。而在后期7000~ 10800 s的时间段内,可以考虑适当的增加速栅与 减速栅之间的间距以降低加速栅与减速栅较大的 相对位移变化造成的风险。其次以降低三栅极间 温度差为目的,可以在三个栅极的支撑连接部位采 用高导热性的陶瓷材料,或是提高栅极的表面发射 系数,以实现尽量降低温度差的目的。目前仅通过 仿真模拟得到了栅极的瞬态结构位移变化,后续将 开展专项试验以验证分析结果的有效性。

参考文献:

- [1] 孙明明,张天平,王亮. 30 cm 口径离子推力器热特性模拟 分析[J]. 真空与低温,2014,20(3):158-162.
- [2] Haag T W, Soulas G C. Performance of 8 cm Pyrolytic–Graphite Ion Thruster Optics[C]//38th Joint Propulsion Conference, 2002.
- [3] Soulas G C, Frandina M M. Ion Engine Grid Gap Measurements [C]//40th AIAA Joint Propulsion Conference, Fort Lauderdale, 2004:3961.
- [4] 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,2016,37(7):1393-1400.
- [5] Meckel N, Polaha J, Juhlin N. Structural analysis of pyrolytic graphite optics for the HiPEP ion thruster[C]//40th Joint Propulsion Conference, 2004.
- [6] 孙明明,张天平,陈娟娟,等. LIPS-200 环型会切磁场离子 推力器热模型计算分析[J]. 推进技术,2015,36(8):1274-1280.
- [7] 郑茂繁. 离子发动机栅极组件的热应力分析[J]. 真空与低温,2006,12(1):33-36.

关于《真空与低温》杂志投稿需提交英文图题、表题的通知

为了进一步加强《真空与低温》杂志在国际领域的交流与影响,跟上科技期刊国际化发展的趋势,本刊2017年起,论文中的所有图题、表题一律要有中英文对照。希望作者对编辑部的工作给予支持,在提交论文时将图题、表题给出相应的英文。

(本刊编辑部)