

离子推力器空心阴极点火可靠性评价研究

杨 威,陈继巍,贾艳辉,孟 伟,黄永杰

(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:空心阴极作为离子推力器放电室等离子体电离源初电子和束流中和电子的电子源,其点火可靠性直接影响到推力器的工作可靠性。以20 cm离子推力器在轨工作剖面为例,对空心阴极预期寿命下的可靠度进行了评价。采用小样本的可靠性试验与可靠性评价理论结合的方法,得到了LHC-5空心阴极点火6 000次时在置信区间0.90和0.95的点火可靠性好于0.98。结果证明LHC-5空心阴极可靠性满足空间应用要求。研究成果对空心阴极可靠性增长设计和电推进产品可靠性评价方法研究具有积极意义。

关键词:离子推力器;空心阴极;开关点火;可靠性

中图分类号:V439*.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2015)02-0096-04

DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2015.02.008

STUDY ON THE EVALUATION OF THE IGNITION RELIABILITY FOR ION THRUSTER'S HOLLOW CATHODE

YANG Wei, CHEN Ji-wei, JIA Yan-hui, MENG Wei, HUANG Yong-jie

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,

Lanzhou Institute of Space Technology and Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: As hollow cathode is the primary electron source for Ion thruster discharge chamber plasma ionization and also for electron beam neutralization, its ignition reliability directly affects the reliability of thruster operation. This paper depicted the evaluation of the reliability of ignition under the expected life of the hollow cathode by taking 20 cm ion thruster in orbit cross-section as an example. By using the method of a small sample of the reliability testing and combination of reliability assessment theory, the results were obtained that between confidence intervals 0.9 to 0.95, hollow cathode ignition reliability is better than 0.98 when LHC-5 hollow cathode ignition times reaching 6 000 times. The results proved that the reliability of the hollow cathode of LHC-5 meeting the requirements of space applications. The research results showed positive significance to reliability growth design of hollow cathode and research in reliability evaluation method of electric propulsion products.

Key words: Ion thruster; hollow cathode; Ignition; reliability

0 引言

空心阴极是离子和霍尔推力器的关键部组件之一^[1]。在启动离子推力器时,必须首先实现主阴极和中和器点火,因此如果空心阴极未正常启动,整台推力器将无法工作。空心阴极作为离子推力器的单点失效部件,失效模式包括加热器失效、发射体失效、离子刻蚀失效及空心阴极孔板离子刻蚀失效等^[2]。

目前电推进空心阴极可靠性评价仍需依赖试验^[3]。作为离子推力器的独立组件,空心阴极组件可以单独开展可靠性评价试验。20世纪90年代,美国NASA LeRC针对空心阴极6 000次开关点火要求,采用8支空心阴极加热器样本开展了加热器开关次数可靠性评价试验,以对预期寿命的可靠性开展评价^[4],其中一支试验样本完成32 000次开关点火^[5]。2008年,美国GRC依据NEXT40离子推力器

收稿日期:2014-11-27

基金项目:科工局国防基础科研(B0320132008),兰州空间技术研究所自主研发项目

作者简介:杨威(1983-),男,内蒙古通辽市人,工程师,从事真空放电空心阴极技术研究。E-mail:qiqi94520@126.com。

应用需求,针对空心阴极加热器开展了可靠性验证与评价研究,采用5支加热器样本开展了开关次数可靠性考核试验,开机6 min,关机4 min循环,三支加热器在13 000次时加热丝开路失效,另外两支完成10 000次开关后停止试验,利用实验数据结合小样本可靠性评价方法,得到加热器在置信度0.9时,空心阴极预期12 615次开关的可靠度0.90^[6-7]。日本在1993年完成了针对ETS-VI平台离子推力器空心阴极的可靠性评价试验,采用10支样本按照真实在轨工作剖面进行点火验证试验,但未结合可靠性评价理论对预期寿命可靠度给出评价^[8-9]。另外,美国L-3通信电子公司^[10],意大利Laben/Protel公司^[11-12]和英国的QinetiQ公司^[13-14]等都针对不同的应用目标对空心阴极组件开展了可靠性评价试验。

LHC-5空心阴极是兰州空间技术物理研究所研制的LIPS-200离子推力器的放电阴极。其设计寿命为开关次数大于6 000次,11 000 h。空心阴极采用的电子发射材料,即发射体为LaB₆。LaB₆与Ba-W发射体相比具有发射电流密度大,抗中毒能力强的优点。因此,LaB₆工作时对工质气体的纯度要求比Ba-W低两个数量级。但是,LaB₆发射体的发射功函数为2.67 eV比Ba-W的2.06 eV高,在相同的电流发射密度下电子发射温度分别为1 650 ℃和1 100 ℃。因此,LaB₆空心阴极更为关心加热器开关点火可靠性。兰州空间物理研究所针对加热器开关点火可靠性评价开展了专项研究。

文章介绍了加热器可靠性考核实验的设备和考核结果分析情况,并基于试验结果,对加热器达到预期开关次数点火成功的可靠度做了理论分析。

1 试验设备

长寿命可靠性评价试验在兰州空间技术物理研究所空心阴极地面专用真空设备TS-5^[15]上开展。该设备主舱直径800 mm,高度800 mm,4个副舱均直径为200 mm,长度500 mm。副舱上配置磁传动装置,副舱和主舱之间用闸阀隔离。副舱主要用于更换试验件,磁传动用于将试验件从副舱推到主舱。在4个副舱与主舱全贯通的情况下,系统本底真空度可以达到 2×10^{-4} Pa。

空心阴极开关次数和点火可靠性试验按照以下两种试验工况开展:(1)空心阴极加热电流7.5 A,点火成功1 min后关闭,冷却30 min为1次循环;(2)空心阴极加热电流7.5 A,点火成功后持续放电120 min,冷却30 min为1次循环。

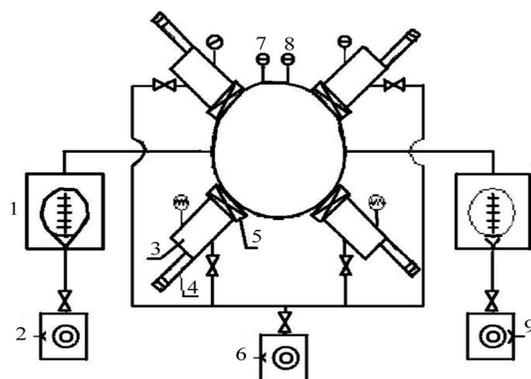


图1 TS-5真空系统配置示意图

1. 机械泵;2,9. 分子泵;3. 副舱;4. 磁传动;5. 200 mm闸阀;
6. 2XZ-4机械泵;7. ZJ52T电阻规;8. ZJ27热阴极电离规

2 试验过程

空心阴极点火可靠性试验共计4个批次9支样本,其中第一、二批次各2支,第三批次1支,第四批次4只。试验装置的接线如图2所示。

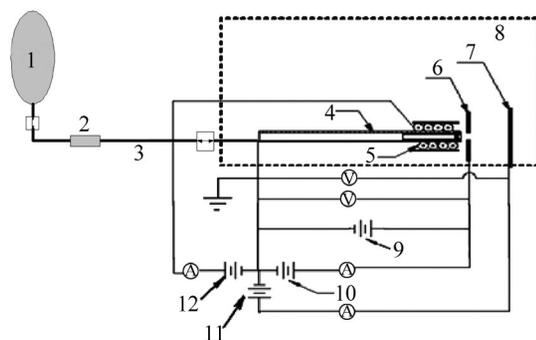


图2 空心阴极试验的接线示意图

1. 高纯氙气;2. 质量流量计;3. 供气管路;4. 阴极本体;5. 加热器;
6. 触持极;7. 阳极;8. 真空环境舱;9. 点火电源;10. 触持极电源;11. 阳极电源;12. 加热电源

3 试验结果和讨论

空心阴极开关点火可靠性试验结果如表1所列。目前为止,无失效数据。采用无失效数据开展可靠性分析通常比较困难,研究结果可以为空心阴极点火可靠性评价给出阶段性分析结果,同时也是空心阴极点火可靠性评价方法的探索。

加热丝材料的高温蒸发和冷热交变引起的热丝微观组织改变是影响空心阴极点火可靠性的主要因素,其失效服从威布尔分布,如式(1):

$$P(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为失效概率; t 为运行时间; β 为形状因子; η 为位置因子^[15]。对于 N 个零失效数据寿命试验,即

在空心阴极失效之前试验终止,假设终止的时间为 t 。在置信度 C 下确定位置因子:

$$\eta = t \left[-\frac{\ln(1-C)}{N} \right]^{-\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

威布尔分布的可靠度可以表示为:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (3)$$

当产品寿命服从威布尔分布时,可以通过对数威布尔分布的位置因子和形状因子的最好线性无偏估计方法,获得产品各种寿命特征的估计值。利用该方法结合表 1 数据确定了形状因子 β 和位置因子 η 的值分别为 8.335 7 和 16 952。因此,预测的空心阴极加热器开关点火的相对概率分布曲线如图 3 所示。

表 1 空心阴极开关点火可靠性

批次	编号	试验流程	循环次数	状态
1	LHC-5-1-01	点火成功 1 min 后关闭,冷却 30 min	12 669	满足 2 倍裕度后停止试验
	LHC-5-1-02		12 843	满足 2 倍裕度后停止试验
2	LHC-5-2-01	点火成功 1 min 后关闭,冷却 30 min	8 135	设备原因停止试验,
	LHC-5-2-02		9 483	试验空心阴极点火正常
3	LHC-5-3-01	点火成功 120 min 后关闭,冷却 30 min	3 818	试验正在开展
	LHC-5-4-01		1 216	
	LHC-5-4-02		1 230	
	LHC-5-4-03		1 206	
	LHC-5-4-04		1 224	

图 3 为空心阴极开关点火试验进行至 14 000 ~ 19 000 次之间时,空心阴极发生故障概率最大,期间在 16 900 次左右时空心阴极发生故障的概率最大。

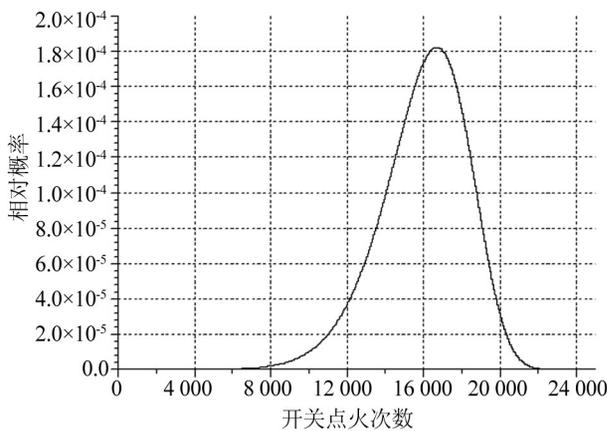


图 3 LHC-5 空心阴极点火可靠性相对概率分布

采用威布尔分布预测的 LHC-5 空心阴极在置信度为 90% 和 95% 下的开关点火可靠性分布曲线,如图 4 所示。

图 4 显示 LHC-5 空心阴极预期开关点火 6 000 次时,可靠度预测结果为:90% 置信度下的可靠度为 0.999 895% 置信度下可靠度为 0.999 5。随着空心阴极可靠性考核试验的不断积累,可靠性评价数据将会更加完善。另外,该结果也为推力器可靠性评价提供了数据支持。

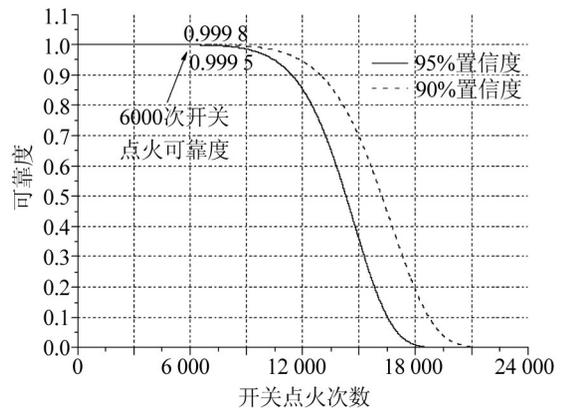


图 4 LHC-5 空心阴极预期点火次数可靠度曲线

4 结论

LHC-5 空心阴极作为 20 cm 离子推力器的关键组件是推力器的可靠性单点。LHC-5 空心阴极点火失效,20 cm 离子推力器将无法工作。兰州空间技术物理研究所针对 LHC-5 空心阴极空间应用目标开展了开关点火可靠性试验,9 支试验样本中 4 支完成考核目标终止试验,5 支验证试验正在继续。结合阶段性试验结果对可靠性开展了理论评价。分析结果显示置信度 90% 和 95% 下,LHC-5 空心阴极达到 6 000 次开关点火的可靠度分别为 0.999 8 和 0.999 5。本研究对空心阴极可靠性评价经验和数据积累具有促进作用,为推力器或其他部组件的可靠性评价提供了方法参考。
(下转第 103 页)

表 3 各工况模拟结果

加热功率/W	出口汽化率	壁面平均温度/°C
300	0.638 9	79.6
350	0.723 6	82.4
400	0.840 7	86.6
450	0.929 7	92.7

由蒸发或冷凝计算方程可知,冷却端框槽道中的气体汽化率与制冷量成正比。在流量一定并满足壁面温度要求的情况下,出口处的汽化率越高,制冷量越大,制冷剂越能得到充分利用。

3 结论

根据冷框结构,设计了几种不同的槽道布置方案,通过计算各方案的汽化率和总制冷量,得到了冷框槽道设计的最优方案。并对流量为 1.603g/s 时,冷却端框的最大制冷量进行了计算。该冷框结构紧凑,具有热流密度大的特点。在合理的假设前提下,采用这种热分析方法,能近似地分析内部的流动状态及制冷量。分析的结果为冷框的下一步热力学分析和结构优化起指导作用。

参考文献:

- [1] 唐小伟. 开式节流制冷技术在局部环境温度控制中的应用研究[J]. 真空与低温, 2010, 16(4): 223-226.
- [2] Irt C W, nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [3] 孙东亮, 徐进良, 王丽. 求解两相蒸发和冷凝问题的气液相变模型[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 7-11
- [4] 魏敬华, 潘良明, 袁德文, 等. 过冷流动沸腾相变过程汽泡特性的 VOF 方法模拟[J]. 核动力工程, 2012, 33(6): 65-71.
- [5] Kandlikar S, Garimella S, Li D, et al. Heat tranr and fluid flow in minichasfennels and microchannels[M]. Netherlands: Elsevier, 2006.
- [6] 蔡昊, 张文瑞. 一种新型混合制冷剂配比分析及试验验证 [R]. 第十一届全国低温工程大会论文集, 2013: 309-312
- [7] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [8] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. FLUENT 12 流体分析及工程仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [9] Shimada S, Satho K, Gotoh Y, et al. Ion thruster system development of ETS-VI[R]. IEPC, 1991-14.
- [10] Polk J E, Goebel D M. Ongoing wear test of a XIPS-25cm thruster discharge cathode[R]. AIAA, 2008.
- [11] Ahmed Rudwan I M, Wallace N C, Coletti M, et al. Emitter depletion measurement and modeling in the T5&T6 Kaufman type ion thrusters[R]. IEPC, 2007.
- [12] Ahmed Rudwan I M, Wallace N C, Kelly M, et al. Dispenser temperature profile measurement and discharge current division in the T5&T6 Kaufman type ion thruster[R]. IEPC, 2007.
- [13] Bianconi M, Cirri G, Brun M L, et al. A review of the manufacturing and characterization activities at PROEL of a plasma bridge neutralizer for the RIT 10 ion thruster[R]. AIAA, 1990.
- [14] Serveri A, Matticari G, Matucci A, et al. Neutralizer/plasma contactor technologies: review of development activities at proel tecnologie [R]. IEPC, 1995.
- [15] Brophy J R, Polk J E, Randolph T M, et al. Lifetime Qualification of Electric Thrusters for Deep-Space Missions[C]//44th Joint Propulsion Conference, AIAA-2008-5184, Hartford, CT. 2008.

(上接第 99 页)

参考文献:

- [1] 张天平, 刘乐柱, 贾艳辉. 电推进系统空心阴极产品试验技术[J]. 火箭推进, 2010, 36(1): 58-62.
- [2] 郭宁, 江豪成, 高军, 等. 离子发动机空心阴极失效形式分析[J]. 真空与低温, 2005, 11(4): 239-242.
- [3] 张天平, 袁子, 田华兵. 电推进系统空心阴极研制试验技术[J]. 真空电子技术, 2007(2): 9-14.
- [4] Soulas G C. Status of hollow cathode heater development for the space station plasma contactor[R]. AIAA, 1994.
- [5] James S, Zakany P E, Luis R. Space Station ignition Test status at 32 000 Cycles[R]. IEPC, 1997.
- [6] Pinero L R, Sovey J S. NEXT thruster component verification testing[R]. AIAA, 2007.
- [7] Herman D A, Pinero L R. NASA's Evolutionary Xenon Thruster (NEXT) component verification testing[R]. AIAA, 2008.
- [8] Shimada S, Satho K, Gotoh Y, et al. Ion thruster endurance test using development model thruster for ETS-VI[R]. IEPC, 1993.