

# 电推进系统空心阴极产品试验技术

张天平, 刘乐柱, 贾艳辉  
(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 空心阴极是电推进系统可靠性和工作寿命关键部件, 空心阴极产品的研制在很大程度上依赖于阴极试验技术的支持。在介绍空心阴极试验分类和试验设备的基础上, 从性能试验、验收和鉴定试验及寿命验证试验等方面讨论了电推进系统空心阴极的产品试验技术。

**关键词:** 空心阴极; 电推进; 鉴定试验; 寿命试验

**中图分类号:** V439.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2010) 01-0058-05

## Test technology of hollow cathode products for electric propulsion system

Zhang Tianping, Liu Lezhu, Jia Yanhui

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, 730000, China)

**Abstract:** A hollow cathode is a key assembly for reliability and lifetime of an electric propulsion system. The development of a hollow cathode product depends on test technology to a large degree. Based on an introduction to the test classification and test facility of the hollow cathode, the test technology of a hollow cathode product applicable to electric propulsion system is discussed from performance test, acceptance test, qualification test and lifetime test respectively. It is concluded that the most suitable method of lifetime assessment of a hollow cathode product for either long lifetime or high power electric propulsion system is a combination of practical test and theoretical model.

**Key words:** hollow cathode; electric propulsion; qualification test; life test

---

收稿日期: 2009-10-23; 修回日期: 2009-11-19。

作者简介: 张天平 (1963—), 男, 研究员, 研究领域为航天器推进技术与工程研究。

0 引言

空心阴极是离子和霍尔电推进系统的关键部件。电推进技术发展和电推进系统应用的实践证明, 空心阴极不仅对电推进系统的工作效率和可靠性具有重要影响, 而且也是电推进系统长寿命和高可靠的最主要限制因素<sup>[1-9]</sup>。最近 10 多年, 美国在千瓦级电推进空心阴极技术方面获得了突破性进展, 深空一号离子推力器空心阴极在空间飞行累计工作达到 16kh 以上<sup>[9]</sup>, 其备份推力器阴极地面试验累计寿命达到 30kh 以上<sup>[7,9]</sup>。

电推进空心阴极的研制仍然未能摆脱对试验技术的强烈依赖<sup>[9]</sup>, 空心阴极产品更是要通过一系列严格的鉴定试验和验收试验, 才能被应用于空间飞行航天器电推进系统。从空心阴极的试验分类、试验设备及产品试验技术等三个方面介绍电推进系统应用空心阴极产品的试验技术。

1 试验分类与试验设备

1.1 试验分类

电推进空心阴极一般都带触持极, 主要目的是降低阴极部件腐蚀和点火电压 (功率)。模拟电推进系统空心阴极工作情况的试验系统基本组成如图 1, 试验需要加热器、触持极、点火及阳极 4 个电源, 阳极可以是对实际推力器上阳极的模拟, 也可以是对中和器情况等离子体电位虚拟表面的模拟。

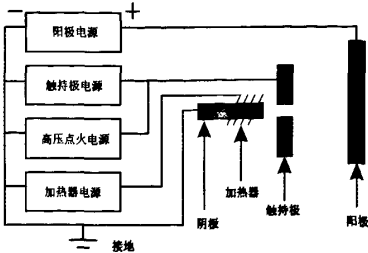


图 1 阴极试验结构类型原理

Fig.1 Structure classification principle of hollow cathode test

从结构形式上, 可以把空心阴极试验分为三

种类型:

(1) 二极管结构类型试验。二极管结构类型试验就是阴极只对触持极放电。这种类型试验不是对电推进阴极正常工作情况的模拟, 而是对电推进旁路工作和点火工作情况的模拟, 其中的旁路工作情况包括无束流引出的点火中和器、无阳极放电的点火放电阴极。二极管试验类型非常适合阴极点火启动可靠性和点火启动循环寿命的验证;

(2) 三极管结构类型试验。三极管结构类型试验就是阴极同时对触持极和阳极放电。这种类型试验是对电推进阴极实际工作情况的近似模拟。有时候为了研究实际推力器放电室对阴极工作性能的影响, 往往采用模拟推力器放电室磁场、真空度、屏栅、阳极形状及距离的三极管试验方法, 这种试验具有很高的仿真能力;

(3) 阳极结构类型试验。阳极结构类型试验就是阴极只对阳极放电, 触持极处于浮电位。阳极试验比二极管试验更接近阴极实际工况, 因为电推进阴极正常工作时的阳极电流远大于触持极电流, 早期的有些霍尔推力器应用甚至采用无触持极阴极。

从电推进空心阴极工程产品研制的角度, 可以把空心阴极试验分为研制试验、验收和鉴定试验及寿命验证试验等类别。这种试验分类和其他航天产品研制的试验分类没有本质的差别。需要特别指出, 对电推进空心阴极的最真实试验还是推力器配套试验, 但由于试验成本费用昂贵和对配套试验设备系统的高要求, 一般仅限于阴极工程产品的鉴定试验或寿命验证试验, 并且与推力器甚至整个电推进系统的鉴定试验或寿命验证试验同步安排实施, 如深空一号飞行备份推力器的 30kh 寿命验证试验<sup>[7,9]</sup>。

1.2 试验设备

相对完整的电推进空心阴极试验设备系统的组成包括: 真空舱设备、推进剂气体供应系统、阴极电源、阴极组件 (含触持极)、测量与诊断系统、控制系统、模拟阳极 (放电室) 及真实推力器等。其中的测量与诊断系统包括内诊断设备、外诊断设备及数据获取与贮存等组成部分。图 2 给出了各部分之间的相互关联。

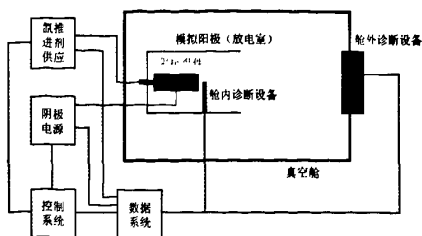


图2 阴极试验设备系统组成原理

Fig.2 Facility system principle of hollow cathode test

阴极试验真空舱设备一般为不锈钢材料结构真空室,采用低温泵抽气系统而不用扩散泵,以防止油扩散对阴极发射体及表面的污染。真空室尺寸根据内部诊断设备、模拟推力器、阴极试验流率范围、真空度要求等具体情况确定。阴极试验对真空度的要求一般在  $1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$  范围,对寿命验证试验,真空度应当尽可能高些。

推进剂气体供应系统为阴极提供流率范围、稳定性和气体纯度满足试验要求的氩气及其他推进剂气体。对钨钨阴极,要求的氩气纯度应达到99.999%的研究级或99.9995%的推进级。对六硼化镧阴极纯度要求可降低一个量级。阴极试验推进剂供应系统的组成包括氩气瓶、管路、机械调压阀、开关阀、压力传感器、气体纯化器、流量传感器及流量控制调节器等。气体纯化器的作用是吸收水和氧等对阴极发射体具有化学中毒作用的杂质,这点对钨钨阴极的长寿命试验非常重要。气体流率调节对绝大多数阴极试验都是必要的,常用的流量调节功能元件包括针阀、多孔节流器及磁致伸缩节流器等。因为阴极试验的流率非常低( $\text{mg/s}$ 量级),流量传感器都是特殊研制的。管路一般为电抛光不锈钢管,内表面粗糙度均方根要达到  $38 \mu\text{m}$ ,使用前要进行10多小时的烘烤出气处理,以清除吸附的有害气体杂质。供应系统中相对大气处于负压(真空)的下游部分的密封性要很好,防止大气中的氧和水等分子渗入到管路内,必要时可以把负压部分放在辅助真空室中。

阴极电源共4个,分别为加热器电源、触持极电源、点火电源及阳极电源。加热器、触持及阳极电源均为稳流电源,加热器电源稳流要求是

由加热丝电阻特性决定的,开始加热时的低电阻不允许通过大电流,否则会烧损电阻丝。触持和阳极电源的稳流特性是电推进稳定工作的必要条件。点火电源在早期采用过高压直流,现在全采用高压直流脉冲。试验时4个电源与阴极发射体共地,并直接接于真空舱设备的地。

阴极试验的测量与诊断系统的组成对不同试验差别较大。安装在真空舱内部的常用诊断设备包括测量阴极等离子体参数的朗缪耳探针、测量阴极表面不同位置温度的温度传感器等。安装在真空舱外部的常用诊断设备包括测量温度及分布的光学高温计、热成像辐射计等。阴极试验测量的参数较多,包括加热器电流和电压、触持极电流和电压、阳极电流和电压、推进剂流率、真空舱压力、阴极温度及等离子体参数等。直流电流大小通过电源输出读数测量,直流电压用多道电压表测量,交流电流和电压成分用数字示波器测量。推进剂流率及其稳定性测量用流量计和压力传感器,等离子体参数测量用L探针,阴极温度测量用热偶、高温光学温度计及热成像辐射计等。常用的热偶温度传感器包括铂-铂铑热偶和钨钨(5%)-钨铼(26%)热偶等。

控制系统对试验过程进行控制和监测,实施试验系统保护和故障中断,记录各种测量参数。对寿命验证试验,应用控制系统是节省试验成本的必要选择。模拟推力器阳极从最简单的阳极模拟,到比较复杂的磁场和阳极形状模拟,一直到实际的推力器。另外,对进行高低温点火鉴定试验的阴极,还需要配置高低温环境条件控制装置。

## 2 产品试验技术

### 2.1 性能试验

阴极性能试验的目的是为了表征当前状态阴极在额定工作条件下的工作性能,所以阴极性能试验经常在磨损试验、验收试验、鉴定试验及寿命验证试验中出现,作为确认阴极工作性能是否正常或工作性能变化大小的有效手段。性能试验一般采用三极结构类型,有时候也采用二极结构

或阳极结构类型。

以三极结构类型试验为例, 进行阴极性能试验时, 触持极电流和阳极电流始终处在额定值点, 具体的试验步骤为: (1)首先在额定推进剂流率下测量阴极稳定工作后的触持极电压、阳极电压; (2)小增量调高流率, 测量新流率下稳定工作后的触持极电压、阳极电压; (3)相对额定流率对称减小调节流率, 再次测量新流率下稳定工作后的触持极电压、阳极电压; (4)绘制流率与触持极电压和阳极电压的试验曲线。

## 2.2 验收试验和鉴定试验

所有阴极在交付和装配前应进行组件级验收试验。试验项目、试验次序及试验方法包括: (1)加热器确信试验。进行 150 次加热器加热循环试验, 确认加热器功能和加热规程, 没有发现加热器电阻特性的可观测变化为通过试验; (2)在二极结构类型下进行工作试验, 在额定流率下测量触持极电压与电流关系, 并确认其重复性; (3)在三极结构类型下进行工作试验, 在额定流率下同时测量触持极和阳极电压与电流关系, 并确认重复性; (4)进行验收级力学环境试验; (5)重复进行 (2) 中的二极结构类型试验, 并比较振动前后电压与电流曲线, 没有异常变化为通过。阴极组装机于推力器或推力器装配于航天器后, 还需要进行包括振动、冲击、辐射和传导电磁发射及敏感性、热真空等验收试验, 这里不再叙述。

空心阴极产品的鉴定试验基于完成并通过验收试验的产品, 主要的试验项目包括: 鉴定级力学环境试验、高低温点火试验、点火循环次数寿命试验及累计工作寿命试验等。其中后两项试验将在 2.3 中专门介绍。鉴定级力学环境试验包括振动和冲击试验, 力学环境试验前后应分别进行阴极性能试验, 通过对比性能试验结果来判定阴极产品是否通过了鉴定级试验。阴极高低温点火试验的主要目的是确认阴极具有能够在应用环境最低温度条件下能够可靠点火并正常工作的能力, 试验采用二极结构类型, 点火采用实际工作点火程序和额定工作条件, 阴极温度以阴极顶板温度或触持极温度为代表。具体的最低温度条件根据航天器使命确定, 从低轨道的 $-50^{\circ}\text{C}$ 左右到

同步轨道的 $-90^{\circ}\text{C}$ 左右, 对深空探测航天器可能达到 $-150^{\circ}\text{C}$ 以下。低温点火试验时测量点火电压、点火时间和点火后稳定工作的电流和电压参数, 并与室温或更高温度点火试验数据进行比较。阴极高低温点火试验至少应进行 8 次高低温热循环和低温端点火启动。

## 2.3 寿命验证试验

空心阴极寿命验证试验应当是鉴定试验的内容, 但由于其高成本和长周期等特殊特性, 这里单独介绍。电推进空心阴极的寿命包括累计工作时间寿命和点火启动次数寿命两个方面, 累计工作时间寿命验证的最低要求为电推进实际工作累计寿命的全额 (1 倍) 验证, 一般要求为达到 1.5 倍。点火次数验证以相应的可靠度为依据, 常用的可靠度分为 90%、95% 及 99% 等, 点火次数寿命试验可靠性采用威布尔分布进行统计分析, 例如为达到 99% 可靠度的 6000 次点火要求, 试验次数要达到 32000 次。寿命验证试验中, 阴极暴露大气后必须进行激活程序处理, 出现非阴极本身原因引起的试验中断后, 重新开始试验前, 可安排进行一次阴极性能试验。

累计工作时间寿命验证试验采用三极结构类型, 阴极工作在额定条件或最大发射电流工作条件, 寿命试验中的阴极性能通过触持极电压、阳极电压、发射体温度、点火电压及点火时间等监测参数判断, 点火时间增加、触持极电压升高、点火电压升高及发射体温度升高都是阴极性能出现衰退的表现, 其原因包括发射体表面化学变化、浸渍源材料消耗、加热器性能衰减、阴极孔和触持极孔物理变化等。累计工作寿命验证试验中需要预先制定终止寿命试验的准则, 主要是点火电压、点火时间、阳极电压、触持极电压、发射体温度等单个参数或几个参数的规定值范围。累计工作时间寿命验证试验结束后, 往往需要进行破坏性检测, 采用的方法和检测内容包括: (1) 阴极和发射体外观的光学和电子显微镜检查, 以确认物理状态; (2) 用扫描电镜的二次电子和背散射电子发射图象确定阴极表面的微观形貌特征; (3) 用扫描电镜的能量色散 X 射线质谱仪确定表面沉积物基本元素; (4) 用 X 射线微衍射分

析仪确认发射体表面的化合物组成; (5) 阴极顶板和阴极孔的金相分析。

点火启动或循环寿命试验采用二极结构类型, 可以采用加速剖面方法、实际工作剖面方法或者两种方法的组合, 实际工作剖面方法就是按照阴极实际应用时的不工作时间(或旁路时间)和工作时间进行循环, 而加速剖面方法中对阴极实际应用工作时间和不工作时间进行适当缩减, 以加快试验进度。工作时间缩减以发射电流达到额定值、触持极电压达到稳定工作电压的90%以上为前提条件, 不工作时间缩减以阴极点火必须使用点火电源而不是直接用触持电源即可实现点火为条件。实际试验中可以采用2种剖面的分段工作或交替工作。循环点火的程序与一般点火类似, 循环寿命试验中的阴极性能通过触持极电压、发射体温度、点火电压、点火时间等监测参数判断, 终止试验的准则也需要预先规定。

阴极寿命验证试验是一种高成本、长周期的试验, 与推力器一起进行寿命验证试验的成本更高, 例如6.4mm钨钨阴极在深空一号飞行备份推力器上的30kh寿命试验就历时4年多<sup>[7]</sup>, 对100kh工作寿命和1.2倍试验验证要求, 时间将长达15年以上<sup>[2,10]</sup>, 将变得非常不现实, 因此需要发展基于试验数据和理论模型基础上的空心阴极工作寿命可靠预测技术<sup>[11,12]</sup>。

### 3 结论

(1) 空心阴极是电推进系统的可靠性和工作寿命关键部件。

(2) 空心阴极产品的验收试验和鉴定试验正在逐步走向规范。

(3) 随着电推进功率水平和工作寿命要求的大幅增加, 空心阴极试验的高成本和长周期使得进行完全的寿命验证试验变得不现实, 发展基于试验数据和理论模型基础之上的寿命预测可靠方

法非常必要。

#### 参考文献:

- [1] Jacobson D T, John J, Kamhawi H, et al. An Overview of Hall Thruster Development at NASA's John H. Glenn Research Center[R]. AIAA 2005-4242.
- [2] Van-Noord J L, Kamhawi H, Mcewen H K. Characterization of a High Current, Long Life Hollow Cathode[R]. NASA/TM 2006-214095.
- [3] Randolph T, Polk J. An Overview of the Nuclear Electric Xenon Ion System (NEXIS) Activity [R]. AIAA 2004-3450.
- [4] Rovey J L, Gallimore A D. Dormant Cathode Plasma Properties and Erosion Analysis in a Multiple-Cathode, High-Power, Rectangular Discharge Chamber [R]. AIAA 2005-4241.
- [5] 张天平. 国外电推进系统空心阴极技术现状[J]. 上海航天, 2008, 25(1): 39-46.
- [6] Polk J E, Kakuda R Y, Brinza D, et al. Demonstration of the NSTAR Ion Propulsion System on the Deep Space One Mission[R]. IEPC 2001-075.
- [7] Sengupta A, Brophy J R., Goodfellow K D. An Overview of the Results from the 30,000 Hr Life Test of Deep Space 1 Flight Spare Ion Engine[R]. AIAA 2004-3608.
- [8] Sengupta A. Destructive Physical Analysis of Hollow Cathodes from the Deep Space 1 Flight Spare Ion Engine 30,000 Hr Life Test[R]. IEPC 2005-026.
- [9] 张天平. 电推进系统空心阴极研制试验技术[J]. 真空电子技术, 2007, 12(2): 9-14.
- [10] Geobel D M, Katz I, Polk J, Mikellides I G. Extending Hollow Cathode Life for Electric Propulsion in Long-Term Missions[R]. AIAA 2004-5911.
- [11] Tighe W G, Chien K R, Goebel D M, et al. Hollow Cathode Ignition and Life Model[R]. AIAA 2005-3666.
- [12] Kovaleski S D. Life Model of Hollow Cathodes Using a Barium Calcium Aluminate Impregnated Tungsten Emitter [R]. IEPC 2001-276.

(编辑: 马 杰)