doi:10.11887/j.cn.202004015

http://journal. nudt. edu. cn

LaB_6 空心阴极中毒特性^{*}

杨 威¹,张天平¹,龙建飞^{2,3},郭 宁¹,刘明正¹,谷增杰¹

(1. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073; 3. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:LaB。 阴极与其他类型阴极相比具有电子发射电流密度大等优点,已广泛用于电推进、高发射密 度电子枪等产品。为了研究 LaB。空心阴极中毒特性、识别 LaB。空心阴极主要失效模式,分别对 LaB。空心阴 极暴露大气后性能变化特征和引起性能变化的原因进行了研究。结果表明:LaB。空心阴极在暴露大气后表 面吸附大量中毒气体,出现了发射体表面逸出功增加、发射体短期中毒现象。此时空心阴极的放电电压和阴 极顶温度均有所上升,经过短期工作后放电电压和阴极顶温度均恢复初始状态。但 LaB。空心阴极严重中毒 后,并不能通过加热和离子轰击方式去除表面生成的氧化物。因此,可以在实验过程中通过监测空心阴极的 阴极顶温度和阳极电压变化间接表征空心阴极发射体状态。

关键词:LaB₆ 空心阴极;寿命实验;氧中毒;阴极顶温度 中图分类号:V475.1 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2020)04-093-05

Poisoning characteristics of LaB₆ hollow cathode

YANG Wei¹, ZHANG Tianping¹, LONG Jianfei^{2,3}, GUO Ning¹, LIU Mingzheng¹, GU Zengjie¹

National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Technology & Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;
 College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Compared with other cathodes, LaB_6 cathode has the advantage of high electron emission current density, and has been widely used in electric propulsion, high emission density electron gun and other products. In order to analyze the poisoning characteristics of the LaB_6 hollow cathode and identify its failure mode, the performance change features and reasons of LaB_6 hollow cathode exposed to atmosphere were studied. The results show that the LaB_6 hollow cathode adsorbs a great deal of poisonous gas on the surface of the emitter during exposure to the atmosphere, and while the work function from the emitter surface increases, the emitter appears short-term poisoning phenomenon. The discharge voltage and hollow cathode plate temperature are increased, and the discharge voltage and cathode top temperature are restored to the initial state after short-term operation. However, if the poisoning phenomenon of LaB_6 hollow cathode is serious, the oxide generated on the surface can not be removed by heating and ion bombardment. Therefore, the emitter state of hollow cathode can be indirectly characterized by monitoring the change of cathode temperature and anode voltage during the test.

Keywords: LaB₆ hollow cathode; life test; oxygen poisoning; orifice plate temperature

空心阴极是电推进系统的核心部件之一,也 是限制电推进系统的寿命和可靠性的关键因素之 一^[1-2]。根据不同任务需求,一般要求空心阴极 寿命为数万小时^[3]。空心阴极在工作时一般选 用氙气作为工质气体,其体积分数要求一般为 99.999 5%。空心阴极长时间工作,工质气体中 杂质(氧和水)与 LaB₆(六硼化镧)发射体持续发 生反应,最终将导致其中毒^[4-5]。空心阴极内部 发射体中毒后其性能会出现大幅波动,此时电推 力器性能也随之变化^[6-7],最终将影响整星变轨 轨道位置或错过最佳变轨时机。空心阴极的工作 过程如图1所示,工质气体通过阴极管进入发射 体内,工质气体在阴极顶限流小孔的作用下,阴极 内的气体压力通常要比管外的压力高几个数量 级,大约可达1~2 kPa^[6-7]。利用加热器将发射 体加热到1800 K 左右,在触持极与发射体之间施 加数百伏的点火电压后,在发射体内部产生气体 放电。在气体放电建立起来以后,阴极管内会产

^{*} 收稿日期:2019-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11702123);军用电子元器件支撑项目(1607XM0004) 作者简介:杨威(1983—),男,内蒙古通辽人,博士研究生,E-mail;365955393@qq.com; 龙建飞(通信作者),男,高级工程师,博士,E-mail;Ljf510@163.com





图1 至心阴极结构小息

Fig. 1 Schematic diagram of hollow cathode structure

生高密度的等离子体,在发射体表面产生亚微米尺度的等离子体鞘层,发射体表面形成了10⁷ V/m的强电场,发射体在表面的场增强效应作用下对外发射热电子。如果发射体发生中毒,在放电时发射体表面逸出功将增加,表面电子发射密度将下降。

1951 年,Lafferty 在研究一些化合物的发射性 能时,发现 LaB₆ 阴极具有优异的发射性能^[4]。后 续 LaB₆ 阴极的使用经验表明,发射体材料对微量 活性气体十分敏感,导致空心阴极在使用过程中 性能退化,是影响阴极寿命的重要因素之一^[5,8]。 目前尚未有文献对 LaB₆ 空心阴极中毒特性展开 研究。

本文采用了实验方法,统计了实验期间阴极 顶温度和阳极电压变化情况,并采用表面分析方 法对空心阴极寿命实验期间中毒样品进行了研 究,结合实验期间出现的阴极顶温度偏高和异常 现象进行了分析,以揭示空心阴极发射体中毒及 恢复的规律。

1 实验装置

空心阴极寿命实验选用的是 TS - 5B 地面测 试设备,该设备是兰州空间技术物理研究所自主 研制的用于空心阴极筛选、性能测试和寿命实验 的实 验 平 台。真 空 舱 直 径 500 mm、长 度 1200 mm,配备抽速为 1300 L/s 的磁悬浮分子泵, 本底真空度优于 5 × 10⁻⁵ Pa。

本文基于两支 LaB₆ 空心阴极(LHC20 - 1 和 LHC20 - 2)的寿命实验开展研究,空心阴极发射 体材料为多晶 LaB₆,工质气体选用高纯氙气,体 积分数 \geq 99.999 5%(其中 H₂的体积分数为 0.000 1%, O₂、H₂O、CO₂的体积分数均为 0.000 01%),使用质量流量计控制工质流率。 LaB₆ 空心阴极实验装置为平板三极管结构,实验 原理如图 2 所示。空心阴极的阴极顶温度采用光 学高温计(WGG2 - 201 型)直接对阴极顶进行 测量。

2 实验结果

空心阴极采用持续放电工作方式,阳极电流





为20 A,触持极电流为0.6 A,工质气体流率为0.272 mg/s。为了验证 LaB。空心阴极暴露大气后的性能变化,实验期间间隔 500 h 开舱,后将 LaB。空心阴极暴露于大气内 24 h。实验期间记录空心阴极电压和阴极顶温度等关键特性的变化。图 3 是寿命实验期间空心阴极阳极电压变化 情况。



图 3 寿命实验期间空心阴极阳极电压变化 Fig. 3 Anode voltage variation of hollow cathode during life test

通过图 3 可以看出,空心阴极每次出舱暴露 大气后,均会出现阳极电压上升问题,但持续工 作 50 h 后阳极电压又恢复至正常值。其中 LHC20-1空心阴极完成1500 h 寿命实验后继 续实验时出现电压持续偏高的现象,当完成 2000 h 实验检查后再次开展实验时,空心阴极 阳极电压出现持续升高并无下降的现象。

在 LaB₆ 空心阴极产品中, 阴极顶内侧与 LaB₆ 发射体接触, 两者的温度相差不多(根据文 献[9], 阴极顶温度与发射体温度相差约 100 ~ 200 ℃), 故实验期间可通过监测阴极顶温度间接 表征发射体温度。寿命实验过程中 LaB₆ 空心阴 极的阴极顶温度变化情况如图 4 所示。

由图4可以看出,每次空心阴极出舱暴露于 大气后,阴极顶的温度则上升100~150℃,而







LHC20-2 空心阴极在工作 1500 h 后则出现了阴 极顶温度持续上升的现象,此时阴极顶温度升高 约200℃。

分析与讨论 3

3.1 暴露大气对空心阴极放电的影响分析

LaB₆对氧和水非常敏感,当与氧接触后首先 生成 La-B-0,在此基础成核生长,最后生成 La(BO₂)₃。La(BO₂)₃的熔点为1141 ℃,氧化物不 容易清除;而生成的 B₂O₃ 的熔点近似为450 ℃,当 温度接近 1000 ℃时, B₂O₃ 蒸发明显^[10-11]。在富 氧条件下 LaB₆ 发射体与氧将发生以下反应: $2\text{LaB}_6 + 10.5\text{O}_2 \rightarrow \text{La}_2 - B_{12} - O_{21(\text{glass})} \rightarrow$

 $x \text{La}(\text{BO}_2)_{3(\text{crystal})} + \text{La}_{2-x} \text{O}_{21-6x(\text{glass})}$ (1)通过以上反应式可以看出,LaB。发射体氧化 后发射体表面生成 La(BO₂), 和氧化镧, 该化合 物的逸出功远高于 LaB。发射体,因此造成了发射 体表面逸出功变大。根据 Richardson-Dushman 公

式,阴极表面发射电子电流密度与温度之间关系 可以表示为:

$$j_{e} = \beta T^{2} e^{-e\phi/kT}$$
 (2)

式中:j. 是发射电子电流密度;T 是发射体表面温 度: ϕ 为表面功函数(单位为 eV):e 为电子电量:k 是玻尔兹曼常数; $\beta = 4\pi m_e q k^2 / h^3$ 为理论常数,其 中*m*。是电子质量,*q*是电子电量,*h*是普朗克常量。

空心阴极工作在恒流模式,空心阴极发射的 总电流密度和发射体表面状态有很大关系[13-14]。 阴极发射体表面总电流密度 j 可以表示为:

$$j = j_i - j_{rev} + j_e \tag{3}$$

式中, ji 是表面离子电流密度, jrev 是电子返流 密度。

离子电流和电子返流密度由发射体内部的等

离子体密度 n_{ex} 电子温度 T_{e} (单位为 eV)和表面的 鞘层电压 ϕ_{sheath} 决定。发射电子电流密度与发射体 表面温度 T 相关,用 Richardson-Dushman 公式描 述^[10,13]。阴极表面离子电流密度可以表示为:

$$\dot{q}_{\rm i} = n_{\rm i} q v_{\rm i} = 0.\ 606 n_{\rm e} q \left(\frac{e T_{\rm e}}{m_{\rm i}}\right)^{1/2}$$
 (4)

式中,n;为鞘层边缘离子密度,v;为玻姆速率,m; 为离子质量。

电子返流电流是空心阴极筒内部高能电子通 过发射体表面鞘层到达发射体表面形成的电 流^[15],其密度可以表示为:

$$j_{\rm rev} = \frac{1}{4} n_{\rm e} q \left(\frac{8eT_{\rm e}}{\pi m_{\rm e}}\right)^{1/2} e^{-\phi_{\rm sheath}/T_{\rm e}}$$
(5)

空心阴极自持放电靠发射体区离子回轰热量 维持发射体热电子发射,空心阴极热模型在文 献[16]中已有如下结论:

$$\dot{q} = -j_e \phi_{Wf} + j_{rev} (2T_e + \phi_{Wf}) + j_i (\phi_{sheath} + 0.5T_e + \phi_V - \phi_{Wf})$$

 $= -j\phi_{\rm Wf} + 2T_{\rm e}j_{\rm rev} + j_{\rm i}(\phi_{\rm sheath} + 0.5T_{\rm e} + \phi_{\rm V}) \quad (6)$ 式中, ϕ_{Wf} 、 ϕ_{V} 和 T。单位均为 eV。发射体表面电 子发射率和其表面的功函数 $\phi_{wt}(经验值) 相关,$ 同时电子返流也会在发射体表面产生热,平均电 子动能为2T。。离子轰击发射体表面热量产生的 动能为 ϕ_{sheath} + 0.5 T_{e} , 电离电势为 ϕ_{Vo}

式(6)说明,自持放电时,内部离子的轰击发 射体表面为空心阴极提供热能,发射电子带走热 能,带走的热能正比于发射体的逸出功。当氧进 入发射体区后将与发射体表面硼和镧发生反 应(1),生成的氧化物导致表面的逸出功增加,发 射电子带走的热量增多[11,16-17]。为了维持总发 射电流不变,空心阴极放电电压将升高,从而增加 鞘层电压以增大离子回轰发射体产生的热量。

以上分析说明,发射体逸出功升高,必然会表 现出空心阴极自持放电电压升高及阴极顶温度的 升高。因此,暴露大气后的空心阴极放电电压及 阴极顶温度均有所升高的实验现象反映出发射体 的逸出功的升高,即出现了中毒现象。短时间工 作后放电电压及阴极顶温度降低,反映出发射体 的逸出功逐渐降低,发射能力逐渐恢复正常水平。 这些现象说明,暴露大气造成的阴极中毒是一种 轻微的中毒现象,空心阴极放电工作时具有一定 的自我清洁能力。

3.2 严重氧化对空心阴极放电的影响

LHC20-1 空心阴极在寿命实验后期阳极电压 持续升高,实验后经检查确认为:供气系统压力传感 器密封圈损坏,大气漏入(漏率约为 10³ Pa・m³/s)

LHC20-1 空心阴极供气系统,从而导致 LaB₆ 发射体及阴极管等均出现了严重中毒现象。

为了确定寿命实验过程中 LaB₆ 空心阴极是 否中毒,将 LHC20-2 空心阴极解剖分析。

正常空心阴极 LaB₆ 发射体结构致密,呈紫红 色。观察失效空心阴极内部 LaB₆ 发射体,发现空 心阴极发射体区域呈疏松形貌,表面呈暗紫色,发 射体内表面附着一层白色物质,如图 5 所示。



图 5 中毒空心阴极 LaB₆ 发射体状态 Fig. 5 Morphology of poisoned LaB₆ emitters

由图 5 可以初步断定,LHC20 - 2 空心阴极的 LaB₆ 发射体已严重氧化。扫描电子显微镜照 片显示,发射体表面已变为疏松的多孔结构(见 图 6)。能谱仪分析表明(见图 7),发射体表面的 主要 成分为 B(64.03%)、O(29.83%)及 La (6.14%)。B/La 比例约为 10.4,发射体表面氧 元素含量较高,说明发射体表面应为 LaB₆ 与氧化 镧的混合物。



图 6 LaB₆ 发射体断面微观形貌





在图 3 和图 4 中, LHC20 - 2 空心阴极在 1500 h 前, 其电压和阴极顶温度的变化规律与 LHC20 - 1 空心阴极基本相同, 暴露大气后出现 轻微中毒, 经过短时间放电工作后即可恢复。但 1500 h 后, 放电电压持续升高, 据此可以断定, 供 气系统在本次暴露大气实验后因重新装配不良而 产生漏气, 从而造成发射体的持续氧化, 随着氧化 层的加厚, 发射体的逸出功增高, 表现为放电电压 和阴极顶温度持续升高。该空心阴极的实验数据 进一步说明发射体氧化中毒是造成空心阴极维持 电压和阴极顶温度升高的内在原因。

4 结论

LaB。空心阴极暴露在大气中会出现轻微的 中毒现象,主要原因是 LaB。与吸附氧发生反应, 生成硼和镧的氧化物,导致发射体表面逸出功增 加,通过持续加热或离子轰击可以解决恢复阴极 的活性。LaB。空心阴极在大气环境中存放造成 的性能下降是一种可恢复的轻微中毒现象。当氙 气体积分数不高或系统存在漏气时,LaB。表面会 逐渐生成高逸出功的氧化层,使放电电压及阴极 顶温度升高,甚至导致空心阴极永久失效。因此, 通过监测空心阴极放电电压的变化情况,可以间 接判断空心阴极的中毒与激活情况、工作气体的 体积分数以及供气系统的气密性。大气中存放对 LaB。空心阴极的性能不会造成永久性的影响。 LaB。空心阴极使用时应特别注意工质气体的体 积分数和供气系统的气密性。

后续计划在相同等离子体条件下,测试工作 温度及工质气体杂质含量对 LaB₆ 空心阴极中毒 率的影响;确定 LaB₆ 发射体中毒阈值,同时根据 实验结果建立内部等离子体模型与发射体表面环 境耦合模型。

参考文献(References)

- [1] 吴建军,张传胜.离子发动机关键技术分析[J].国防科技大学学报,2003,25(1):7-11.
 WU Jianjun, ZHANG Chuansheng. Analysis of the key technology and construction of ion thruster[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(1):7-11.(in Chinese)
- [2] 张传胜.离子发动机工作过程分析及若干关键问题的初步研究[D].长沙:国防科技大学,2000.
 ZHANG Chuansheng. Analysis of working process of ion engine and preliminary study on some key problems [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000. (in Chinese)
- [3] 温正, 王敏, 仲小清. 多任务模式电推进技术[J]. 航天 器工程, 2014, 23(1): 118-123.

图 7 发射体断面能谱图(LHC20-2) Fig. 7 Emitter cross section energy spectrum (LHC20-2)

WEN Zheng, WANG Min, ZHONG Xiaoqing. Multitask mode electric propulsion technologies [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(1): 118 – 123. (in Chinese)

- [4] Lafferty J M. Boride cathodes [J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22(3): 299.
- [5] 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.
 GUO Ning, JIANG Haocheng, GAO Jun, et al. Analysis of ion thruster hollow cathode failure mode[J]. Vacuum and Cryogenics, 2005, 11(4): 239-242. (in Chinese)
- [6] 于志强,高玉娟,邵文生,等. 钡钨扩散阴极中毒特性综述[J]. 真空电子技术,2017,22(1):22-27.
 YU Zhiqiang, GAO Yujuan, SHAO Wensheng, et al. Review of poisoning character of Ba-W dispenser cathode [J]. Vacuum Electronics Technology, 2017,22(1):22-27. (in Chinese)
- [7] 史锴,王志,孙景春,等. 失效空心阴极发射体的扫描电 镜研究[J]. 现代科学仪器, 2008, 1:51-52.
 SHI Kai, WANG Zhi, SUN Jingchun, et al. Research on the failure emitter of hollow cathode by FESEM[J]. Modern Scientific Instruments, 2008, 1:51-52. (in Chinese)
- [8] 张强基. 六硼化镧阴极的失效分析[J]. 电子学报, 1989, 17(5): 115-117.
 ZHANG Qiangji. Surface studies of failure LaB₆ cathode by

auger spectroscopy [J]. Acta Electronica Sinica, 1989, 17(5): 115-117. (in Chinese)

[9] 孙明明,顾佐,郭宁,等.离子推力器空心阴极热特性模 拟分析[J].强激光与粒子束,2010,22(5):1149-1153.

SUN Mingming, GU Zuo, GUO Ning, et al. Thermal analysis of hollow cathodes for ion thruster [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 1149 – 1153. (in Chinese)

[10] Capece A M, Polk J E, Shepherd J E. Decoupling the thermal and plasma effects on the operation of a xenon hollow cathode with oxygen poisoning gas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(9): 3249 – 3255.

- [11] Wen C H, Wu T M, Wei W C J. Oxidation kinetics of LaB₆ in oxygen rich conditions [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(10/11): 3235-3243.
- [12] 王欲知,陈旭. 真空技术[M]. 2版. 北京:北京航空航 天大学出版社, 2007:140.
 WANG Yuzhi, CHEN Xu. Vacuum technology[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2007:140. (in Chinese)
- [13] 林祖伦,陈泽祥,郭靖扬,等. LaB₆在低压强氮气和氦气中的放电特性[J].强激光与粒子束,2006,18(10): 1745-1748.
 LIN Zulun, CHEN Zexiang, GUO Jingyang, et al. Discharge performance of LaB₆ cathode in helium and nitrogen of low pressure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1745-1748. (in Chinese)
- [14] 谷增杰,郭宁,贾艳辉,等.离子推力器空心阴极分区均 布模型研究[J].推进技术,2017,38(8):1900-1906.
 GU Zengjie, GUO Ning, JIA Yanhui, et al. Numerical study on a regional uniform model for ion thruster hollow cathode[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(8):1900-1906. (in Chinese)
- [15] Polk J E. The effect of reactive gases on hollow cathode operation [C]// Proceedings of 42nd AIAA/ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California, 2006.
- [16] Capece A M, Polk J E, Mikellides I G, et al. Oxygen transport in the internal xenon plasma of a dispenser hollow cathode[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(15): 153302.
- [17] Gallagher H E. Poisoning of LaB₆ cathodes [J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(1): 44 - 51.