

等离子体接触器放电特性试验研究

冯 杰,王彦龙,刘明正,田立成,刘士永,张建新

(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)

摘 要:为了研究等离子体接触器的伏安特性,设计试验分别测试了单支和双支等离子体接触器工作时的伏安特性,并给出了等离子体接触器钳位电压、偏置电压以及触持电压随偏置电流的变化规律。试验结果表明:供气流量率的提升有利于接触器放电效率的改进;等离子体接触器钳位电压、触持电压与偏置电流之间呈现出不同的规律,前者呈现为正阻特性,后者呈现为负阻特性;两支等离子体接触器同时工作时相互之间存在影响,额定值为 5 A 时,两支接触器的发射电流分别为 8 A 和 2 A,因此采用双接触器同时工作时,应尽量采用伏安特性接近的阴极以减小差异性。

关键词:等离子体接触器;伏安特性;正阻特性;负阻特性

中图分类号:V439 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2019)03-0081-06

Experimental research on discharge characteristics of plasma contactor

FENG Jie, WANG Yanlong, LIU Mingzheng, TIAN Licheng, LIU Shiyong, ZHANG Jianxin

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,
Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study the volt-ampere characteristics of plasma contactor, an experiment was designed and conducted to test the volt-ampere characteristics of single and double plasma contactors. In addition, the variation of the clamp voltage, bias voltage and contact voltage of the plasma contactor with the bias current is given. The test results show that the increase of the air supply rate is beneficial to the improvement of discharge efficiency. There is a different law between the clamp voltage, the keeper voltage and the bias current of the plasma contactor. The former shows positive resistance characteristic, while the later shows negative resistance characteristic. Two plasma contactors affect each other while working simultaneously. When the rated value is 5 A, the emission currents of two contactors are 8 A and 2 A, respectively. Therefore, when using double contactors at the same time, the volt-ampere characteristics should be adopted as close as possible to reduce the difference.

Keywords: plasma contactor; volt-ampere characteristics; positive resistance characteristic; negative resistance characteristic

收稿日期:2018-03-05;修回日期:2018-07-17

基金项目:载人航天预研项目(YZR0702)

作者简介:冯 杰(1988—),男,硕士,工程师,研究领域为空间电推进

多余物。试验中舱壁起到接收电子电流的作用,相当于推力器测试或者是空心阴极组件测试中的阳极。

试验分为两个阶段进行:第一阶段仅采用单支接触器产品进行测试;第二阶段则两支接触器同时工作,并监测该系统工作特性。等离子接触器的核心组件为LHC-5型空心阴极,该产品已完成在轨点火工作试验验证^[7]。空心阴极的结构如图2所示。

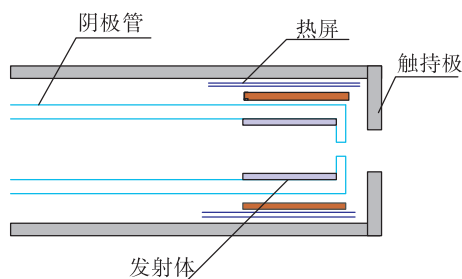


图2 空心阴极结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hollow cathode structure

2 试验结果分析及讨论

2.1 单接触器放电特性

试验的供气、供电方式如图1所示,但同时安装两支接触器。试验中,首先仅对1号接触器进行点火,进行单接触器放电特性测试。期间2号接触器保持为关机状态。

图3所示为接触器钳位电压随氙气流率的变化情况,可以看出,钳位电压与氙气流率间呈负相关关系,即流率越大,钳位电压越小。这是由于等离子体接触器采用的空心阴极为小孔型阴极,当供气流率越大时,空心阴极内部的气压越大、等离子体密度也越大,此时只需要较小的电压值就可以引出额定大小的阳极电流。因此,试验结果表现为氙气流率越大、钳位电压越低的现象。

图4所示为两个不同流率点下等离子体接触器钳位电压随偏置电流变化的趋势。可以看出,钳位电压与偏置电流之间呈现出正相关关系。

当接触器的偏置电流从1 A变化至7 A时,偏置电压对应上升,而且当供气流率较大时,同一发射电流下的偏置电压会更大。在发射电流为1 A时,采用0.9 mg/s的流率供气,接触器钳位电压为

14 V。采用1.8 mg/s的流率供气时,接触器对应的钳位电压为17 V。两者相比较,后者比前者高3 V。

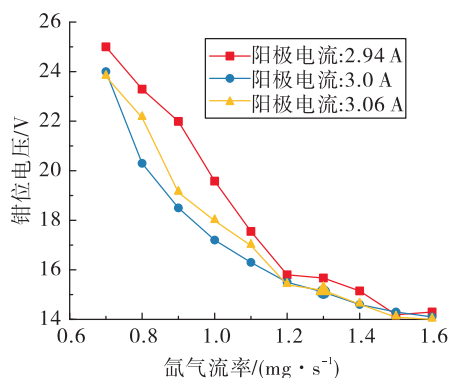


图3 钳位电压随氙气流率的变化

Fig. 3 Change of clamping voltage with Xeon flow rate

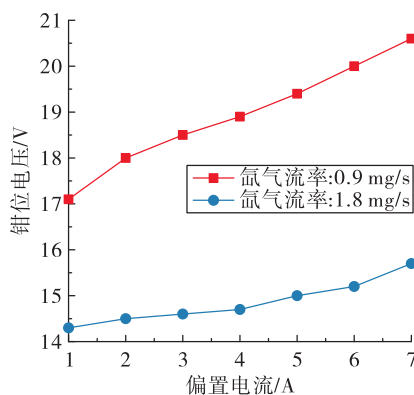


图4 钳位电压随偏置电流的变化

Fig. 4 Change of clamping voltage with bias current

由于接触器用阴极组件为小孔结构,当偏置电流一定时,提高供气流率会使阴极内部中性气体密度增大,对应的等离子体电离度将减小、等离子体电阻增大。钳位电压是电子电流在阴极顶与舱壁间产生的电位降,在数值上等于等离子体电阻与放电电流的乘积。由于提高供气流率时等离子体电阻较原来更高,而偏置电流为固定值,因此,钳位电压值会随着流率的增大而升高。

图5为对应的等效阻抗的变化情况。从图5可以看出,当偏置电流增大时等效阻抗呈明显下降趋势,这是由于偏置电流增大时供气流率为恒定值,此时接触器与舱体之间的电离更为充分,当工质气体电离得越充分,等离子体的电阻率就会越低,对

应的也就呈现出等效阻抗下降的趋势。

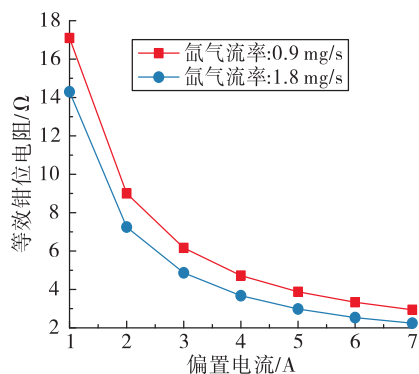


图 5 等效阻抗随偏置电流的变化

Fig. 5 Change of equivalent resistance with bias current

图 6 为等离子体接触器触持电压随偏置电流的变化情况,可以看出,接触器的触持电压与偏置电流之间呈现出典型的负阻抗特性,这与作为其核心组件的空心阴极组件的伏安特性相同^[14]。空心阴极组件工作在气体放电曲线的弧光放电区,当其发射电流不超过转变点时,静态伏安特性都呈现为负阻特性。因此,当单支等离子体接触器处于稳定放电状态时,接触器呈现出了与单阴极类似的伏安特性。

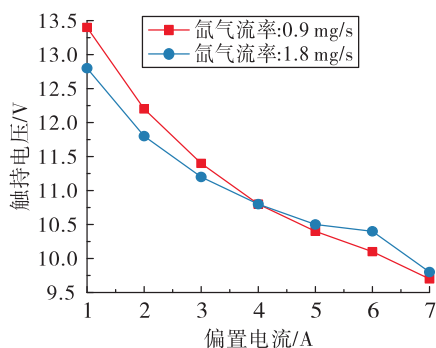


图 6 触持电压随偏置电流的变化

Fig. 6 Change of keeper voltage with bias current

图 7 所示为与图 6 相对应的等效电阻的变化情况,可以看出流率的变化对等离子体接触器的触持等效电阻的影响并不大,这是由于触持极与阴极顶的距离很小,一般仅为 2 ~ 3 mm,在这么小的区域中,等离子体电离率引起的接触器放电特性的变化体现得并不明显。

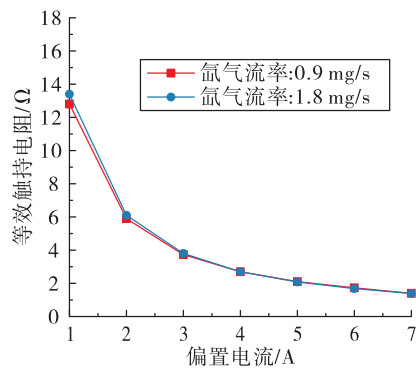


图 7 等效触持阻抗随偏置电流的变化

Fig. 7 Change of equivalent keeper resistance with bias current

2.2 双接触器放电特性

图 8 和图 9 为在试验舱内同时吊装两支等离子体接触器进行试验时偏置电压、触持电压随供气流率的变化。试验期间,两支接触器产品距舱壁的距离均控制为 70 cm。

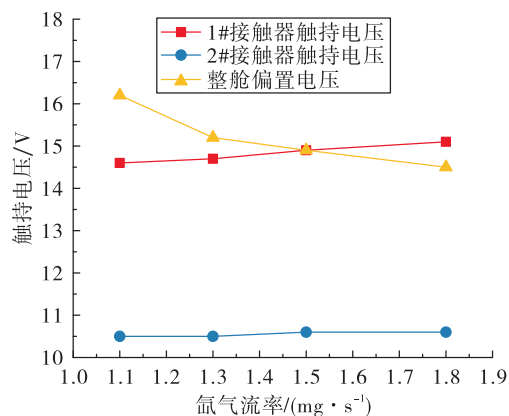


图 8 触持电压随供气流率的变化

Fig. 8 Change of keeper voltage with gas flow

图 8 为在采用双接触器布局时,调整供气流率对 1#、2#接触器产品触持电压及整舱偏置电压影响的曲线。可以看出,随着氙气流率的增大,整舱的偏置电压出现下降。这可以从部分电离等离子体的电阻率表达式中得到解释

$$\eta = \frac{m(v_{ei} + v_{en})}{e^2 n} \quad (1)$$

式中: η 为电阻率; m 为电子质量; v_{ei} 为“电子-离子”碰撞频率; v_{en} 为“电子-中性粒子”碰撞频率; e 为电子电量; n 为等离子体密度。当氙气流率增大

时,等离子体密度上升,由于等离子电阻率与密度呈反比,因此,等离子体电阻率将对应下降,等离子体电阻也将对应下降。而试验中采用恒流源,整个回路中的电流为一恒定值,偏置电压为电阻与电流的乘积,因此,整舱的偏置电压也将下降。

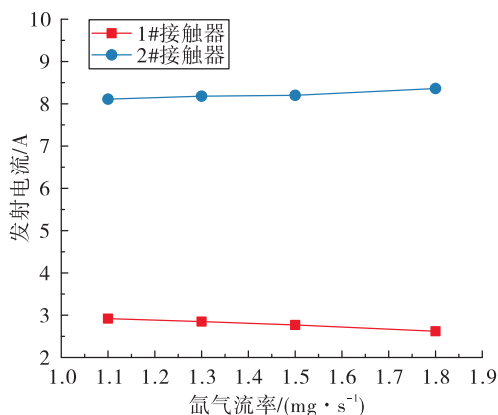


图9 发射电流随供气速率的变化

Fig. 9 Change of emission current with gas flow

接触器产品在轨工作时的一项重要参数是其发射电流,为确定双接触器布局时产品工作稳定性,测试了不同流率点下接触器的发射电流。

图9为在采用双接触器布局时,调整供气速率对1#、2#接触器产品发射电流影响的曲线。试验期间,舱外外加偏置电源开路电压为50 V、预设电流为5.0 A。虽然两支接触器的安装位置完全对称,与舱壁的间距均为70 cm,但成功点火后,系统并未按照预期的两支空心阴极各发射5 A电流的工况工作,而是1号接触器发射2 A左右的电子电流,2号接触器发射8 A左右的电子电流。

由于采用双接触器布局并成功建立起自持放电后,A、B机的负极均和设备舱体连接在一起,而其正极则通过电离后建立的等离子体通道和舱壁连接在一起。因此,A、B机两支回路为并联关系。即A、B两机两端的电压大小相同,但是流过两条回路的电流则分别由两路的等效电阻决定。

分别以三极管模式对A、B机进行组件级的伏安特性测试,测试方法为在1.1 mg/s的流率点下固定阴极组件的触持电流为额定值3.0 A,并将发射电流以0.1 A为梯度从0.0 A开始增大,最终根据测量值分别拟合出A、B机的伏安特性,具体可以表

达为

$$U_A = 33.64 I_A^{-0.179} \quad (2)$$

$$U_B = 26.55 I_B^{-0.178} \quad (3)$$

根据A、B机之间的并联关系,可得

$$U_A = U_B \quad (4)$$

$$I_A + I_B = 10 \text{ A} \quad (5)$$

式中: U_A 为A机两端的电压; U_B 为B机两端的电压; I_A 为A机发射的电子电流; I_B 为B机发射的电子电流。求解式(2)至式(4),得出 $I_A = 7.9 \text{ A}$, $I_B = 2.1 \text{ A}$,这与图9所示的采用双接触器格局工作时两支接触器在1.1 mg/s工况点下的测量值一致。其他几个流率点,如1.3 mg/s,1.5 mg/s,1.8 mg/s时的情况类似。因此,如果需要采用A+B机的工作策略时,需要选用伏安特性尽可能接近的产品以消除这种发射电流差异大的情况。

3 结论

对接触器产品的伏安特性进行了试验研究,结果表明:

1)影响等离子体接触器伏安特性的主要是发射电流与供气速率两项因素,单接触器的伏安特性呈现出钳位电压与发射电流呈正阻特性、触持电压与发射电流呈负阻特性的基本特点。

2)当舱内同时吊装两支接触器时,产品的伏安特性对于发射电流的影响非常明显。两支接触器的发射电流会呈现出一支发射电流明显大于额定电流,另一支小于额定电流的现象。这是由于两支接触器的伏安特性存在细微差别而引起。如果需要采用该种布局策略,则需要选择伏安特性尽量一致的阴极进行试验。

目前的研究仅得到了初步的双等离子体接触器同时工作时的一些基础的特性参数,后续将深化对等离子体接触器特性以及接触器布局对实际工作特性影响的研究。

参考文献:

- [1] MIZERA P F. A summary of spacecraft charging results [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1983, 20 (5): 438-443.
- [2] ROBINSON P A, COAKLEY P. Spacecraft charging-pro-

- gress in the study of dielectrics and plasmas [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27 (5): 944-960.
- [3] 田立成,刘明正,杨威,等.空间站等离子体接触器钳位模式实验研究[J].推进技术,2017,38(3):695-699.
- [4] 马伟,宣益民,韩玉阁,等.长寿命卫星热控涂层性能退化及其对卫星热特征的影响[J].宇航学报,2010,31(2):568-572.
- [5] 刘业楠,赵华,易忠,等.空间站带电效应分析及对策[J].载人航天,2013,19(5):6-12.
- [6] 梁晓锋,周东,秦晓刚,等.表面带电对航天员出舱活动的影响及对策分析[J].航天器环境工程,2014,31(2):168-172.
- [7] PATTERSON M J, HAMLEY J A, VERHRY T. Plasma contactor technology for space station freedom [C]//The 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit. USA: Monterey, 1993.
- [8] CARPENTER C B. On the operational status of the ISS plasma contactor hollow cathodes: AIAA 2004-3425 [R]. USA: AIAA, 2004.
- [9] FERGUSON D C. Effects on space station [C]//2nd International Energy Conversion Engineering Conference. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [10] 田立成,石红,李娟,等.航天器表面充电仿真计算和电位主动控制技术[J].航天器环境工程,2012,29(2):144-149.
- [11] 杨昉,师立勤.航天器浮动电位的初步分析[J].宇航学报,2010,31(10):2422-2426.
- [12] FERGUSON D, CRAVEN P, MINOW J, et al. A theory for rapid charging events on the international space station [C]//1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [13] 乔彩霞,张岩,康小录,等.80 mN 霍尔推力器空心阴极寿命试验[J].火箭推进,2014,40(4):11-15.
- QIAO C X, ZHANG Y, KANG X L, et al. Life test of hollow cathode for 80 mN Hall thruster [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(4):11-15.
- [14] 张岩,康小录,乔彩霞.钨钨空心阴极放电等离子体特性实验研究[J].火箭推进,2014,40(5):55-60.
- ZHANG Y, KANG X L, QIAO C X. Experimental investigation for discharge plasma properties of BaW hollow cathode [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(5):55-60.
- [15] 张天平.兰州空间技术物理研究所电推进新进展[J].火箭推进,2015,41(2):7-12,32.
- ZHANG T P. New progress of electric propulsion technology in LIP [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(2):7-12,32.

(编辑:马 杰)