

用于汞离子推力器的中和器空心阴极的实验研究

胡永年 洪惠阴 张世良 孙玉珠 任 妮 瞿晓明

(兰州物理研究所)

一、中和器空心阴极在推力器中的工作

电子轰击式汞离子推力器组成部分、启动过程及正常运行,在文献[1]中,结合示意图1和图2作了简叙。

汞离子推力器用中和器,如图1所示。由汽化器(5)绝缘器(6)和空心阴极(7)三部分组成。空心阴极为一气体放电电子源,当阴极加热到点火温度后。触持极(8)加上点火电压,阴极—触持极间首先着火放电。进而,放电扩展至汞离子束 I_B 。中和器阴极向离子束中发射与离子流等量电荷的电子流 I_N ,使推力器系统呈电中性。维持推力器稳定工作。

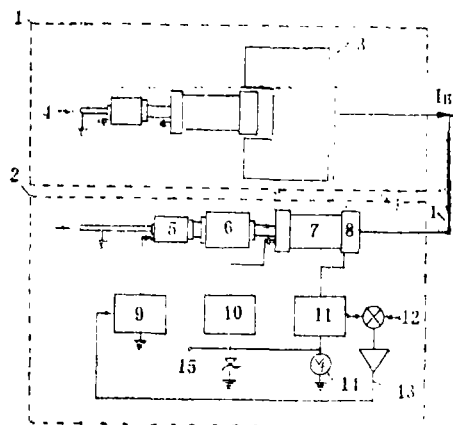


图1 中和器工作示意图。

1. 离子源部分; 2. 中和器、控制回路及电源部分; 3. 离子引出系统; 4. 液汞输入; 5. 汽化器; 6. 绝缘器; 7. 中和器空心阴极; 8. 触持极; 9. 汽化器电源; 10. 阴极加热器电源; 11. 触持极电源; 12. 回路控制设定值 λ ; 13. 汞流率控制回路; 14. 浮动电压指示; 15. 推力器系统公共地, 接屏栅极电源负端

否则,系统将即刻充电至负高压,束流停止。

如图1所示,当推力器正常运行时,推力器系统公共地(15)对地面设备公共地总处于几至十几伏负电位。称推力器浮动电位 U_f ;栅极喷出的离子束中心最高电位,相对地面设备公共地为正十几伏,称束电位 U_B 。中和器阴极向束中发射的电子,籍 $|U_f| + U_B$,称耦合电位 U_c 加速来完成。推力器正常运行时, U_c 一般为15伏左右。当阴极发射逐渐衰减后,为维持发射不变;或为了人工调整卫星电位,在中和器阴极上附加一负偏置电位,等于增加了 U_c 。

中和器空心阴极工作时,从阴极内部直到阴极至汞离子束间,建立起汞等离子体。阴极内发射体(图3)表面,形成正离子鞘层。从而有效地加速阴极发射的电子。而鞘层电位降

U_k 一般小于10伏。离子对阴极内发射体表面的溅射损害不大；再者，在阴极至离子束间，建立了具有低电阻率的等离子体“桥”。由于以上两个原因，在较低耦合电压下，即可支取所需电子流。触持极起点火和维持放电稳定作用。

二、实验设备和 方法〔1〕

中和器阴极在一个直径为500毫米，长600毫米有闸板阀的不锈钢容器内进行实验。容器内有液氮冷套。测试时，容器内压力不高于 5×10^{-4} 帕。

测试接线原理图示于图2。束模拟电极所加电压 U_A ，模拟耦合电压。用图2结构测得的中和

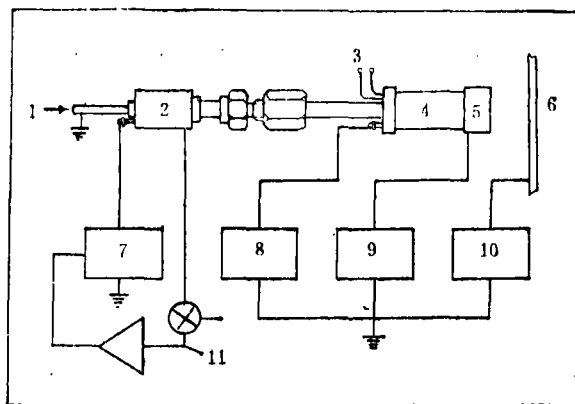


图2 中和器阴极性能测试接线原理图

1. 液汞输入；2. 汽化器；3. 阴极热偶；4. 中和器空心阴极；5. 触持极；6. 束模拟电极；7. 汽化器电源；8. 阴极加热器电源；9. 触持极电源；10. 束模拟电源；11. 汞流率控制回路

器阴极主要性能数据，与阴极在推力器中工作时测得的基本一致〔2〕。

测试时用的中和器阴极结构示于图3。阴极温度由精密光学高温计及热电偶测量。

三、实验结果与讨论

1. 中和器阴极放电特性

在图4示汞流率下，放电均呈“羽”形。工作稳定。在不同汞流率下，基本为一直线。

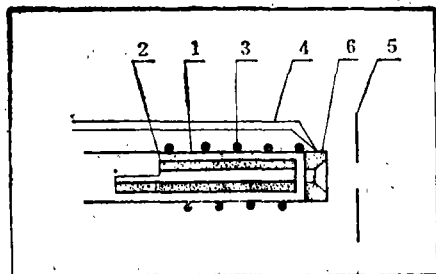


图3 中和器阴极结构示意图

1. 钨管；2. 内发射体；3. 加热器；4. 热电偶；5. 触持极；6. 阴极顶

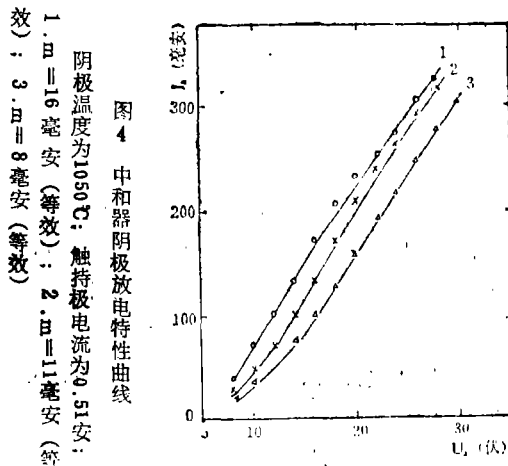


图4 中和器阴极放电特性曲线

阴极温度为1050℃；触持极电流为0.51安；
1. $I_H = 16$ 毫安 (等效)；2. $I_H = 11$ 毫安 (等效)；
3. $I_H = 8$ 毫安 (等效)

其斜率约为15毫安/伏。阳极电压在14伏,可支取80毫安至130毫安。满足8厘米推力器需要。图中的 m 为汞的等效毫安。阳极电压在17伏至20伏,可支取150毫安至200毫安。即在不太高的阳极电压下,可支取较大电流,表明阴极还有潜力。可作为较大推力器中的中和器阴极使用。

在阴极为900℃, m 为5毫安(等效),放电稳定。也进行了伏-安特性曲线测试。支取电流到250毫安,仍为直线。

2. 中和器阴极点火性

中和器阴极点火时,除提供专用点火电压外,一般加大汞流率到正常工作值的5至7倍,视阴极质量及点火电压幅值而定。

我们曾试验了直流点火电压与阴极温度、通过阴极汞流率的关系。其结果示于图5和图6。也曾试验了在不同阴极温度和汞流率下,脉冲点火电压与脉冲重复频率及脉冲宽度的关系(3)。

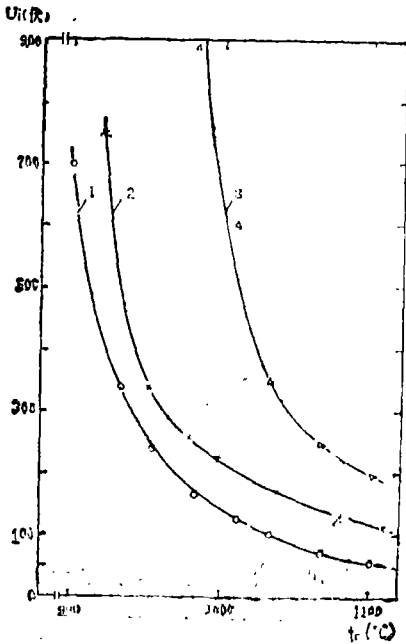


图5 中和器阴极点火电压与阴极温度的关系曲线; 1. $m=31$ 毫安(等效); 2. $m=15$ 毫安(等效); 3. $m=13$ 毫安(等效)

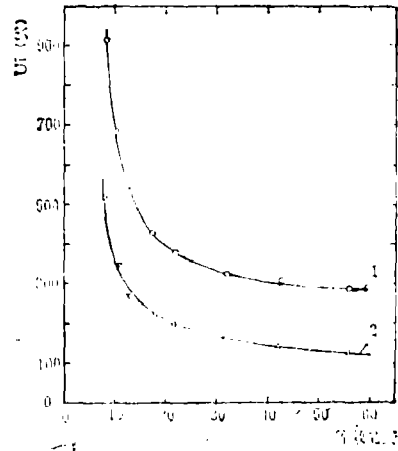


图6 中和器阴极点火电压与通过阴极汞流率关系曲线
曲线1. $t_c=940^\circ\text{C}$; 2. $t_c=980^\circ\text{C}$

由图5和图6看出,点火电压随 m 及 t_c 值下降而上升。当 m 及 t_c 值下降到一定值后点火电压急剧上升。阴极温度取1000℃左右, m 在20至30毫安(等效),在不太高的直流电压下(500伏左右),可以较可靠地点燃阴极。

阴极经多次暴露大气,在1200℃以上多次使用后,平时置于几千帕的真空度中,一年后再测点火性能,其结果如图5中曲线3。在同样工作条件下,点火电压比原来(曲线1)高3至4倍。

随着阴极发射性能老化,点火性能也要变差,由于点火时间较短,适当加大 m 值,汞耗

量有限，而较大幅度加高阴极温度，将严重损坏阴极。

3. 耦合电压

耦合电压稳定性及幅值受多种因素影响。就中和器阴极来说，对既定结构的阴极，与其发射性能、汞流率、触持极电流有密切关系。对此，进行了实验，以便找出合理的耦合电压值。

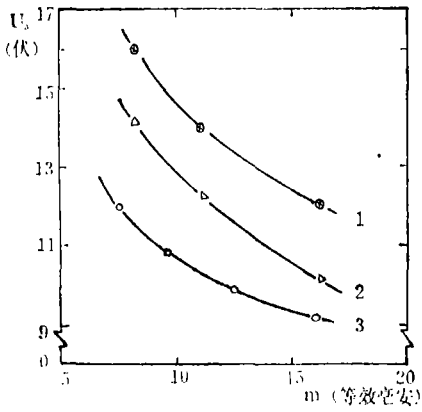


图7 通过阴极汞流率与束模拟极电压的关系
曲线：1. $I_a=100$ 毫安 $t_c=1050^\circ\text{C}$ ；
2. $I_a=80$ 毫安， $t_c=1050^\circ\text{C}$ ；3. $I_a=100$ 毫安； $t_c=1120^\circ\text{C}$

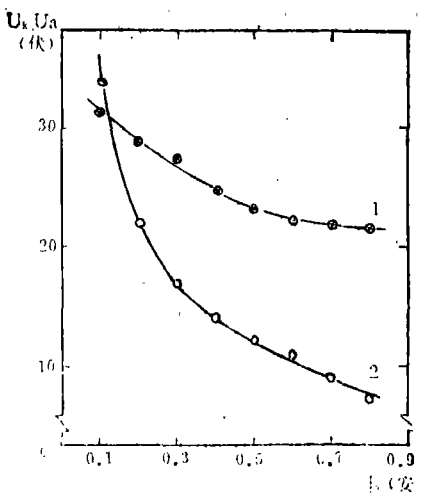


图8 触持极电流 I_k 与束模拟极电压的关系
 $m=14$ 毫安（等效）； $I_a=100$ 毫安
曲线1：触持极电压 U_k ；曲线2：束模拟极电压 U_a

图7和图8表明阴极温度 t_c ，汞流率 m 以及触持极电流 I_k 与束模拟极电压的关系。

由图7曲线1和3看出，支取同样电流，随着 t_c 及 m 值增大，电压下降。 m 值大于15毫安（等效）。电压变化较缓慢。反之， m 值过于小，则电压较快上升。图8为阴极温度不变时， I_k 对电压的影响。 I_k 过于小后，电压很快上升，放电将不稳定。表明 I_k 对电压有较强烈影响。

从图7和图8看出，当 m 取值7至10毫安（等效）， I_k 取0.5安，在电压不超过15伏，可以支取推力器所需80毫安中和电流。工作稳定。

实验中观察到，随着阴极长时间使用老化，耦合电压会逐渐上升。为此，要对 m 及 t_c 值进行适当调整。

4. 阴极对汞流率的控制特性

汽化器易被汞输送系统中及汞中的不洁物（包括金属和非金属杂质）堵塞。使其在工作温度不变时，流量下降；或被污染后，汞与汽化器中多孔钨毛细孔壁浸润，在汽化器温度恒定时，汞流率大幅度上升〔4〕。 m 值变动，不但影响推力器主要指标变化，阴极工作将不稳，甚至熄灭。为此， m 值用下述方法加以稳定。

m 值变化，可引起触持极电压变化，测得结果如图9所示。如工作点取在7至10毫安（等效）范围， m 值变化百分之十，可引起触持极电压变化70毫伏左右。应用这一关系，可组成如图1所示意的、利用触持极电压变量 ΔU_k 来调整汽化器加热功率。以达到使 m 值稳定

在所希望的范围的反馈控制回路。如 m 值变化百分之十,引起比冲变化将小于百分之一。从图7、图9以及汽化器加热功率—汞流率关系曲线考虑, Δm 为 $\pm 10\%$ 是允许的(即耦合电压不会太高; 放电不会出现不稳), 其控制回路也是可以实现的。

从图9中看出, m 值太小, 工作将不稳定; 反之曲线变平, 汞流率稳定性将失控。曲线形状主要与阴极性能及结构有关。

5. 中和器阴极自持放电时的热特性

中和器阴极点火成功, 推力器进入正常工作后, 希望即刻关闭阴极加热器电源。利用返轰阴极的离子加热阴极, 维持所要求的工作温度, 这样有效利用了反轰阴极离子能量。

对既定结构的阴极, 其平衡温度主要与触持极电流 I_k , 中和电流及通过阴极汞流率有关。在推力器稳定工作时, 由于汞流变率化很小, 可不予考虑。

触持极电流, 中和电流与阴极自持放电时阴极温度关系示于图10和图11。由两图看出, 阴极温度随 I_k 及 I_a 增大而上升, 工作点取在 I_k 等于0.5安左右, $I_a = 100$ 毫安附近, 其上升速

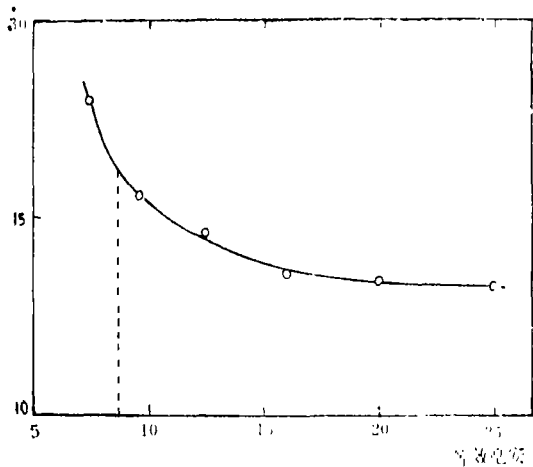


图9 触持极电压随汞流率变化的曲线
 $I_a=100$ 毫安; $t_c=1120^\circ\text{C}$; $I_k=0.55$ 安

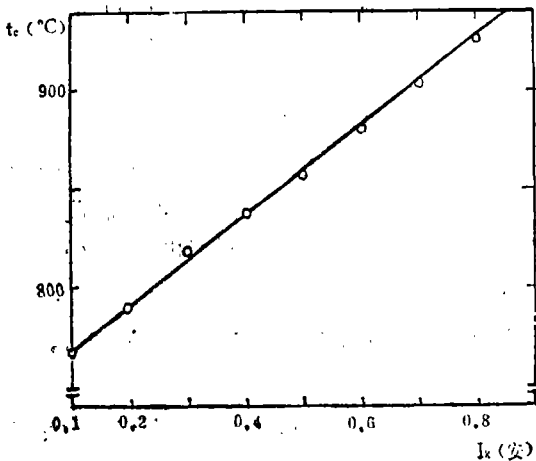


图10 阴极自持放电触持极电流与阴极温度的关系
 $m=14$ 毫安(等效); $I_a=0.1$ 安

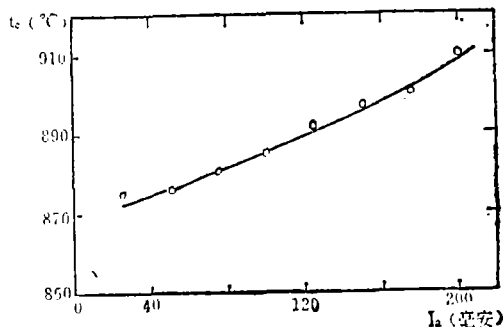


图11 阴极自持放电时 中和电流与阴极温度的关系
 $I_k=0.5$ 安; $m=7$ 毫安(等效)

率约为 $20\sim 22^\circ\text{C}/0.1$ 安。阴极温度均低于 900°C (阴极发射体温要高些), 阴极可稳定工作。

触持极电流 I_k 起着调整阴极温度, 使放电稳定的作用。

自持放电时阴极温度, 与阴极结构和发射性能密切相关。当阴极发射衰减后, 其温度将逐渐上升。

结 论

目前使用的中和器空心阴极,在温度为 1000°C 左右, $m = 20$ 至 30 毫安(等效),在 500 伏直流电压下,可以可靠点火。 $I_k = 0.5$ 安,自持放电时阴极温度为 900°C 至 1050°C , m 等于 6 至 10 毫安(等效),电压在 14 伏以下,可支取 80 至 100 毫安中和电流。满足 8 厘米推力器需要。总功率损耗不超过 9 瓦。

参 考 文 献

- (1) 张世良、胡永年等,真空科学与技术1 1 (1982) 23
- (2) D.C.Byer^s, J.S.R.32 (1971)
- (3) 胡永年、张世良等,真空科学与技术,4 6 (1984) 387
- (4) D.C.Feara, AIAA76-987

用计算机求空间辐射致冷器辐射耦合视因子的积分解

韩 军 崔广德 洪国同 潘雁频

(兰州物理研究所)

辐射致冷是60年代兴起的一种航天器红外遥感系统的致冷方法。因为致冷器重量轻、寿命长、无转动部件、不需要贮存冷液、仅消耗微小的电源作温控使用,因此,这种致冷手段受到了国内外航天部门的普遍关注。

但是,在理论和工艺上辐射致冷还有一定的难度,它对航天器发射轨道和安装位置有所选择^[1]。而红外探测器热稳定性要求很高($\pm 0.1\text{K}$),辐射致冷器是被动工作的,对环境热负载极其敏感。因此,要设计可靠的辐射致冷器必须精确计算外部热流和航天器寄生热负荷。理论上涉及到机、光、电、热、低温、真空等各方面的问题和繁杂的数学计算。其中致冷器表面间的辐射耦合视因子的计算是热力计算的基础。本文在镜反射成像理论的基础上对适用于太阳同步轨道、长方形锥通道的致冷器提出了一种计算机运算方法,计算精度足够高。

一、冷块与锥体的辐射耦合

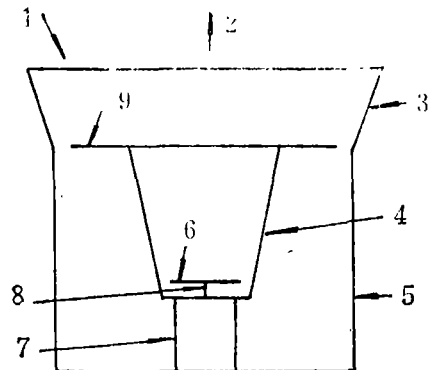


图1 辐射致冷器示意图

- 1. 外热源; 2. 冷空间; 3. 屏; 4. 一级锥壁;
- 5. 外壳; 6. 冷块; 7. 一级支撑; 8. 二级支撑;
- 9. 锥帽沿