

# 大功率多磁极会切场离子源的弧放电特性分析

邹桂清<sup>1)</sup> 钟光武 雷光玖 姜韶凤 卢大伦 曹建勇 刘鹤

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

**摘要** 为了在HL-2A上实现3MW的中性束注入, 我院自主研发了直径为260mm, 高度为240mm的大功率多磁极会切场离子源. 目前, 它的性能已达到并超过了最初设计指标, 放电脉冲为1s时, 最大离子流密度为0.44A/cm<sup>2</sup>; 放电脉冲为3s时, 等离子体离子流密度0.24A/cm<sup>2</sup>; 等离子体非均匀性都在5%—7%范围之内. 目前, 它是我国国内等离子体密度最高, 放电功率最大的长脉冲桶式离子源. 本文通过实验数据与理论相结合的方式对弧放电特性进行分析.

**关键词** 弧放电 等离子体电位

## 1 引言

大功率长脉冲离子源一般由等离子体发生器和加速器两部分构成, 它是中性束注入器非常关键的部件之一, 其性能决定着中性束的注入参数. 目前, 国际上大功率中性束注入器所用的源型, 按照等离子体发生器类型一般分为多磁极会切场离子源(又称为桶式离子源)和大功率射频离子源. 为了在中国环流器二号A(HL-2A托卡马克)装置上实现2MW的中性束注入加热, 核工业西南物理研究院自主研发了直径为260mm, 高度为240mm的大功率多磁极会切场等离子体发生器. 它的优点是结构较简单, 等离子体的均匀性好, 适于大面积引出, 能得到较大的流强, 同时具有较高的放电效率和高的质子比. 该等离子体发生器的结构如图1所示: 36列条状钐钴磁铁分布在桶式放电室四周的外壁上, 同时焊有冷却水管. 等离子体引出区域的直径为17.4cm, 区域内的磁场强度小于15Gs; 多根“发夹”形状的钨灯丝沿圆弧方向分布在上顶盖上, 顶盖中间开有送气口. 通过近期试验数据可知, 目前它的弧放电性能已达到并超过了最初的设计目标. 工作气体为氢气, 工作脉冲3s时, 电探针测得等离子体离子流密度达到0.24A/cm<sup>2</sup>, 等离子体密度大于10<sup>12</sup>cm<sup>-3</sup>; 工作脉冲时间为1s时, 最大离子流密度为0.44A/cm<sup>2</sup>; 两种情况下, 等离子体非均匀性在5%—7%之内, 成为我国国内等离子体密度最高, 功率最大的长脉冲桶式等离子体发生器. 以下将通过实验与理论相结合的方式对气压和灯丝排列方式对放电性

能的影响进行分析.

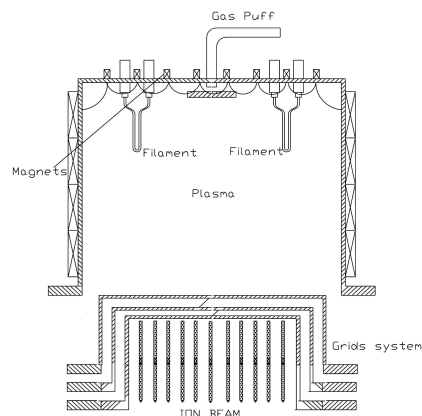


图1 大功率多磁极会切场离子源示意图

## 2 弧放电特性分析

### 2.1 实验平台简介

实验平台由真空系统, 离子源电源系统, 以及控制和采集系统组成. 真空室抽气系统由两套抽率各为每秒3500L的分子泵抽气机组组成. 离子源送气采用可控的电磁阀脉冲送气方式. 灯丝电源采用1500A, 15V直流电源; 放电弧流电源为1500A, 150V直流电源, 该电源的开关采用2400A, 1200V的IGBT器件, 弧流电源回路中串联了8mH的电感.

在参数测量方面, 用磁平衡式霍尔电流传感器测量灯丝加热电流及弧电流; 用分压器测量灯丝电压及

弧电压;用静电探针阵列测量等离子体密度.对于放电室的气压,用薄膜真空规进行测量.

## 2.2 弧放电特性

对直径为1.5mm,长度为15cm的9根灯丝排列方式的源型进行不同气压下的放电实验研究.当灯丝加热电流1060A,放电气压分别为0.17Pa, 0.23Pa, 0.56Pa, 1.06Pa时,测量到的伏安特性曲线如图2(a)所示,该图显示当放电气压较低时,同样的弧压条件下,弧流随着气压的升高而增大,这也表明弧放电产生等离子体的阻抗性随着放电气压的增高而降低.但是当气压过大(大于1.0Pa)时,如图2(a)中的d曲线所示,相对于c曲线来时,弧流反而降低.图2(b)是不同气压下,等离子体饱和离子流密度与弧流的对应关系,由此可知,当弧流低于400A时,等离子体离子流密度与弧流呈线性增加的关系.图2(c)表明等离子体非均匀性随着气压的升高而增大.由此,对于9根灯丝的源型,为了改善等离子体均匀性,弧放电气压一般控制在0.2Pa左右.对图2进行综合分析可知,该源型性能稳定,易于控制,但弧放电产生的等离子体均匀性在

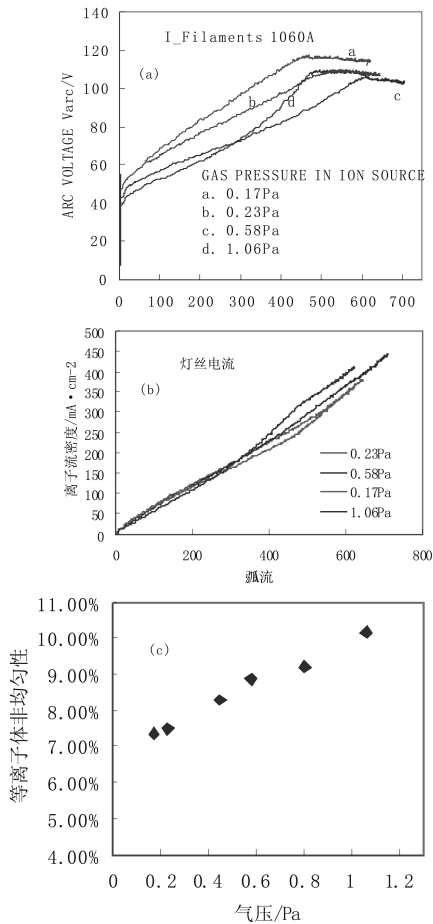


图2 9根灯丝桶式源放电特性

(a) 伏安特性曲线; (b) 离子流密度与弧流的关系曲线; (c) 等离子非均匀性曲线.

7%以上,有待进一步改进.

为了进一步研究多磁极会切场源的弧放电性能,改善等离子体均匀性,提高灯丝的使用寿命,对灯丝排列方式进行了改进:灯丝数量18根,直径为1.0mm,长度不变.当总灯丝加热电流为1076A,气压为0.65Pa时,对应的等离子体离子流密度与弧流的关系曲线如图3所示,从图中可以看出,弧放电效率明显高于图2(b)中各曲线所示的弧放电效率.

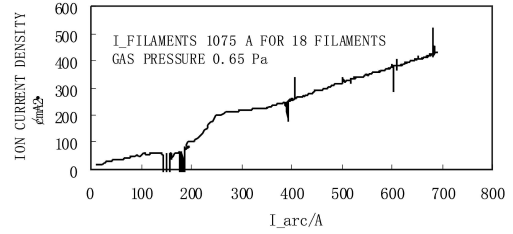


图3 18根灯丝桶式源离子流密度与弧流的关系曲线

## 2.3 分析与讨论

在多磁极会切场等离子体发生器中,热阴极发射的初级电子经阴极鞘层加速至高能态,然后与工作气体或者等离子体发生相互作用,其中包括离子化过程和碰撞过程等,大部分初级电子被热化为等离子体电子.等离子体电子产生率的表达式<sup>[1]</sup>可以写为

$$R = n_p V / \tau + n_p n_0 (\langle \sigma_c v_p \rangle + \langle \sigma_I v_p \rangle) V + n_p n_0 \langle \sigma_I v_p \rangle V, \quad (1)$$

式中 $n_0$ 表示气体密度, $V$ 是等离子体体积, $n_p$ 表示等离子体中初级电子数密度,由灯丝温度决定; $\tau$ 是电子约束时间,由磁场约束来决定; $\langle \sigma_c v_p \rangle$ 与 $\langle \sigma_I v_p \rangle$ 分别是非弹性碰撞截面和离子化截面系数 $v_p$ 是初级电子的速度,由阴极鞘层的电位 $V_{cs}$ 决定:

$$V_{cs} = V_{arc} + \phi, \quad (2)$$

式中 $\phi$ 表示等离子体相对于阳极的电位,如果阳极单鞘层为正离子鞘层, $\phi > 0$ ,则等离子体电子减速,离子加速至阳极表面;反之, $\phi < 0$ ,等离子体电子加速至阳极表面,离子减速至阳极表面.

产生等离子体电子同时,在等离子体边缘区域,等离子体电子和极少部分初级电子经过阳极单鞘层到达阳极上,产生等离子体电子流 $I_e$ ,表达式<sup>[1]</sup>如下:

$$I_e = \frac{1}{4} (8kT_e / \pi m)^{1/2} n_e A_A \exp(-e\phi / kT_e) e, \quad (3)$$

式中 $m$ 为电子质量, $T_e$ 为电子温度, $n_e$ 为等离子体电子数密度, $A_A$ 为有效阳极面积.

在弧放电初始阶段,等离子体产生率大于其损失率,等离子体密度升高.当弧压瞬间升高到足够大并趋于稳定时,等离子体电子的产生率等于其损失率,则等离子体电子数密度不变,放电稳定.此时,等离子

体电位的表达式<sup>[1]</sup>如下:

$$\phi = \frac{kT_e}{e} \ln \left[ \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}} \frac{n_e}{n_p} A_A / \left( \delta n_0 + \gamma + \frac{\beta}{n_0^{1/2}} \right) \right], \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta &= (\langle \sigma_c v_p \rangle + \langle \sigma_I v_p \rangle) V; \\ \gamma &= V/\tau; \\ \beta &= (1 + n_e/n_p) D E^{1/2} A, \end{aligned}$$

式中  $A$  为离子损失面积,  $D$  为常数,  $E$  为等离子体中的电场强度.

根据 (3), (4) 两式, 如果送气气压较低, 当气体密度  $n_0 < (\beta/2\delta)^{2/3}$  时,  $\phi$  随着  $n_0$  的增加而升高, 等离子体密度也将升高, 弧流增大. 当等离子体密度很高时, 将有大量的等离子体离子轰击阴极表面, 使初级电子数密度增加, 导致弧流继续增加; 如果气压较高, 当  $n_0 > (\beta/2\delta)^{2/3}$  时,  $\phi$  随着  $n_0$  的增加而降低, 等离子体密度降低, 弧流降低. 这些结论与图 2(a) 实验结果恰相符.

对于 18 根灯丝的多磁极会切场等离子体发生器, 由于改变了灯丝排列方式, 不仅增加了阴极初级电子

的发射面积  $A$ , 还改变了初级电子的约束方式. 另外, 在放电初始阶段, 等离子体密度相对于阴极发射的初级电子密度来说非常低. 由此根据 (4) 式可知, 放电初始阶段等离子体电位可能远远低于弧阳极电位, 所以放电经常出现不稳定现象, 但离子损失率较低, 弧放电效率较高, 如图 3 所示.

### 3 结论

大量的实验数据及理论分析表明: 低气压放电时, 弧流随着气压的升高而增大, 等离子均匀性变差; 高气压放电时, 弧流随着气压的升高而降低. 通过对比 9 根直径 1.5mm, 长度 15cm 的灯丝与 18 根直径 1mm, 长度 15cm 的灯丝两种排列方式下的实验数据可知: 前者放电稳定, 等离子体非均匀性约为 7%—10%, 长脉冲放电的离子流密度 0.24A/cm<sup>2</sup>; 后者初始阶段放电不稳定, 但稳定后的非均匀性低于 5%, 放电效率较高, 最高离子流密度 0.44A/cm<sup>2</sup>. 由此可知, 两种灯丝排列方式下的弧放电性能各有特色, 下一步将根据离子束引出实验结果, 最终确定灯丝的排列方式.

#### 参考文献(References)

- 1 Dan M. Goebel. Phys. Fluids, 1982, 25(6): 1093

## Arc Discharge Performance Analysis for a High Power Bucket Ion Source

ZOU Gui-Qing<sup>1)</sup> ZHONG Guang-Wu LEI Guang-Jiu JIANG Shao-Feng  
LU Da-Lun CAO Jian-Yong LIU He  
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract** To match the large power long pulse neutral beam injectors for HL-2A Tokamak, a circular magnetic multipole line-cusp ion source (namely a bucket ion source) has been designed. The arc chamber of this ion source is a water-cooled, stainless-steel cylinder 26cm in diameter, 4mm thick, and 24cm long. So far, many arc discharge experiments on this ion source have demonstrated that the plasma density has been 0.24A/cm<sup>2</sup>, for 3 seconds duration, within 5%—7% plasma uniformity, and 3 seconds maximum pulse. Arc discharge characteristics, such as the gas pressure dependence and filaments arrangements dependence have been studied experimentally and theoretically in this paper.

**Key words** arc discharge, plasma potential