

强流双潘宁离子源弧特性研究

胡纯栋 张晓东

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 针对 22cm 双潘宁离子源, 研究了其弧流与放电调节参数的关系以及二次进气的效果, 确定了拉长弧流脉宽、提高弧流强度与稳定性、达成离子源合适工作状态的措施, 为获得高品质的弧流提供了依据。离子源弧特性测试研究结果对提高强流离子源的工作性能以实现 NBI 系统强流准稳态运行有重要的指导意义。

关键词 弧特性, 潘宁离子源, 弧流, 中性束注入器

中图分类号 O530, O461.1

中性粒子束注入加热是磁约束等离子体的有效加热手段, 已广泛应用于 tokamak 等离子体的加热中^[1,2]。它利用高能中性粒子束在等离子体中的电离、热化, 把能量转化成等离子体的内能, 以提高等离子体温度。中性粒子束注入器(Neutral Beam Injector, NBI)是产生高能带电粒子束并将其中性化的复杂系统, 强流离子源是该系统的关键设备。研究 NBI 强流离子源的弧特性, 确定灯丝电压、弧压、进气气量和进气时刻等参数对弧流的影响, 研究结果对 NBI 的实验运行具有非常重要的指导意义。

1 HT-7 NBI 系统简介

1.1 HT-7 NBI 系统的基本组成与工作原理

HT-7 NBI 系统在美国 PLT 装置 NBI 系统的基础上修改改进而成, 由离子源、加速电极、中性化室、偏转磁铁、离子吞食器、漂移管道、功率测量靶等组成(图 1)。

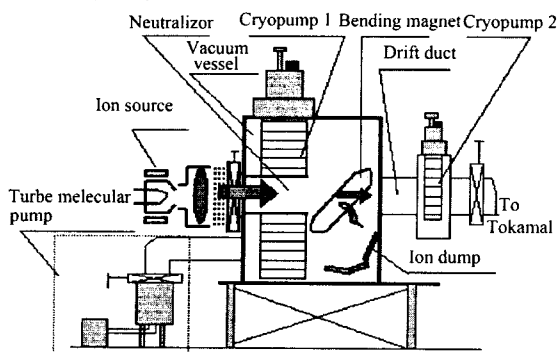


图 1 BNI 系统结构示意图

Fig.1 Schematic view of the neutral beam injector.

其工作原理为: 离子源产生的离子经加速电极加速为几十 keV 的高能离子束, 进入中性化室与气体分子相互作用, 使部分离子转化为高能中性粒子束, 中性粒子束经漂移管道输送到 Tokamak 装置, 对 Tokamak 内的等离子体进行加热, 未中性化的部分由偏转磁铁偏转, 最终被离子吞食器吸收。

1.2 HT-7 NBI 系统的离子源

HT-7 NBI 系统的离子源为双潘宁离子源, 引出面为 $\phi 22\text{ cm}$ 的圆形面(图 2)。其工作原理为: 由灯丝发射的热电子在阴极与中间电极之间的腔体内震荡, 使工作气体(实验中用的是氢气)电离以建立起阴极区等离子体; 阳极电场将阴极区等离子体中的电子引出至二号阳极所围真空室内, 这些电子在一号阳极、二号阳极和靶阴极之间的电场作用下, 与该区域内的工作气体分子发生碰撞、电离以建立阳极区等离子体, 这一放电过程称为起弧。

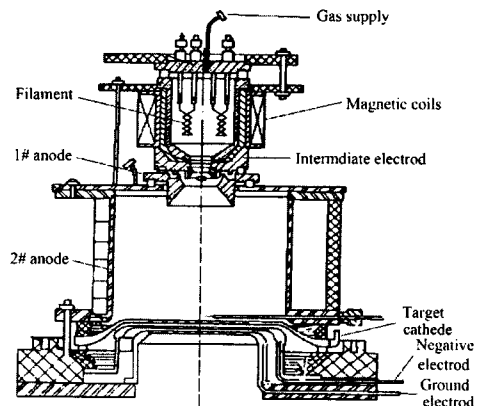


图 2 22 cm 双潘宁离子源结构示意图

Fig.2 Schematic view of the 22-cm duopigatron ion source.

国家自然科学基金资助项目(10575105)资助

第一作者: 胡纯栋, 男, 1963 年出生, 1999 年于中国科学院等离子体物理研究所获博士学位, 研究员, 博士生导师, 主要从事中性束注入加热和诊断研究

收稿日期: 2008-09-08, 修回日期: 2008-12-26

双潘宁离子源工作原理示意图如图 3 所示。为有效约束阴极区热电子使其往返震荡,充分电离工作气体,在中间电极外侧包有磁场线圈,以在阴极区建立约束磁场;为约束阳极区等离子体,又尽量减少磁场对阳极区等离子体密度均匀性的影响,在二号阳极外侧有一组永磁体,使二号阳极所围真空室的边缘处形成会切磁场位形,使该真空室内部的磁场强度几乎为零^[3,4]。

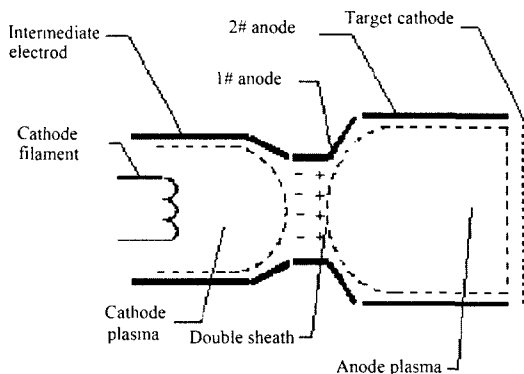


图 3 双潘宁离子源工作原理示意图
Fig.3 Schematic of the duopigatron ion source.

2 HT-7 NBI 系统离子源弧特性实验

2.1 实验方法与目的

为 HT-7 NBI 系统建立了一套基于 PLC 的控制系统,以便实现对灯丝电流、磁场电流、弧电压、放电脉宽、阴极区和二号阳极工作气体进气路压电晶体阀电压、各路进气相对于弧流的提前时刻等参数和时序的设定^[5]。在离子源弧特性实验过程中,对工控机发出指令,完成参数设置与控制系统的工作时序,可调节参数包括灯丝电流、磁场电流、弧电压、实验进气压电阀电压以及放电时序和脉宽。压电阀工作特性测试结果见文献[6]。调试模式一般为根据上次起弧的参数和弧流品质,调节某个参数并验证其对弧流的影响,以确定下一步调节时选取的参数;对于放电脉宽,如本次实验获得较稳定的放电,则下一次实验则将放电脉宽适当拉长;在弧电流较强时,考虑到灯丝的电流承受能力,一般在较短脉宽下进行。实验的目标是寻找出弧电流在 500 A 以上的强弧流稳定放电所需要的参数设置,以及探索长脉冲放电所需的实验参数设置。

2.2 实验设置

阴极灯丝为放电提供初始热电子,是重要的参数设置。根据双潘宁离子源的设计参数,实验中选用两种型号的钨灯丝: $\Phi 1.2 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, $\Phi 1.6 \text{ mm} \times$

150 mm。离子源可安装四根灯丝,实验中分别采用 2 根、3 根、4 根并联,同时调节其他参数寻求最佳的参数设置。测试灯丝性能也为离子源的运行提供操作经验。实验中调节的参数有灯丝数目、灯丝电流、磁场电压、弧压、气阀 1 电压、气阀 2 电压以及各参数的时序。为实验装置的安全,采用渐进方式慢慢提高参数设置,寻求最佳实验参数。实验参数的调节范围如表 1 所示。

表 1 实验参数的调节范围
Table 1 Regulation range of experimental parameters setting

调节参数 Parameters	调节范围 Adjustment range
灯丝电流 Filament current /A	90-440
磁场电流 Magnet current /A	75-100
气阀 1 电压 Voltage of Valve 1 /V	60-110
气阀 2 电压 Voltage of Valve 2 /V	90-115
弧压 Arc voltage /V	130-140

2.3 实验结果与分析

2.3.1 双灯丝起弧实验

双灯丝起弧实验用两根 $\Phi 1.2 \text{ mm}$ 的钨灯丝。先由小灯丝电流、小进气量(未投入气阀 2)、短脉宽开始调试,以确保可以起弧。在弧流不过流的前提下,逐步调整进气量,并投入气阀 2 供气,拉长脉宽,提高弧流强度,当分析认为若灯丝发射能力不足而限制弧流强度的提高时,小幅提高灯丝电流;一旦出现过流,则将参数恢复到先前所实验过的一个较稳定的状态,开始重新调试。经过反复的实验调试,得到了稳定的等离子体放电,其实验波形见图 4。此状态下灯丝电流设置为 205 A,磁场电流为 85 A,弧压 135 V,气阀 1 电压为 65 V,提前弧压 150 ms 投入,气阀 2 电压为 100 V,提前弧压 50 ms 投入。

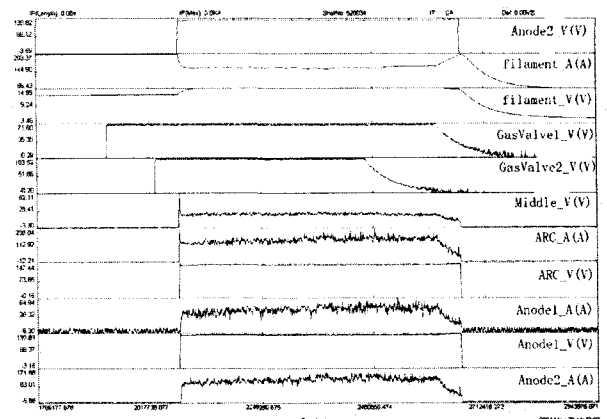


图 4 双灯丝起弧实验波形图
Fig.4 Experimental waveform of arc discharge with two $\Phi 1.2 \text{ mm}$ filaments.

实验波形表明，弧流较为平稳，得到 170 A 的高品质弧流，脉冲宽度为 600 ms。这也为四灯丝的实验奠定了基础。

2.3.2 四灯丝起弧实验

四灯丝起弧模式可提高灯丝的发射能力，获得大弧流的高品质等离子体。经反复实验调试，得到四灯丝($\phi 1.2\text{ mm}$)状态下的高弧流等离子体(图 5)。实验参数为：灯丝电流 420 A，磁场电流 95 A，弧压 135 V，气阀 1 电压 70 V，提前弧压 200 ms 投入，气阀 2 电压 110 V，提前弧压 100 ms 投入。得到弧流为 240 A，脉冲持续 500 ms。实验波形表明，弧流较为平稳，尾部有上翘趋势，这由泵的抽气速度有限、造成离子源内部气压过高而引起，这也是实验中未过分提高进气的原因。此状态下的灯丝发射能力可产生更高弧流的等离子体。如投入低温泵可获得更强更稳定的弧流。

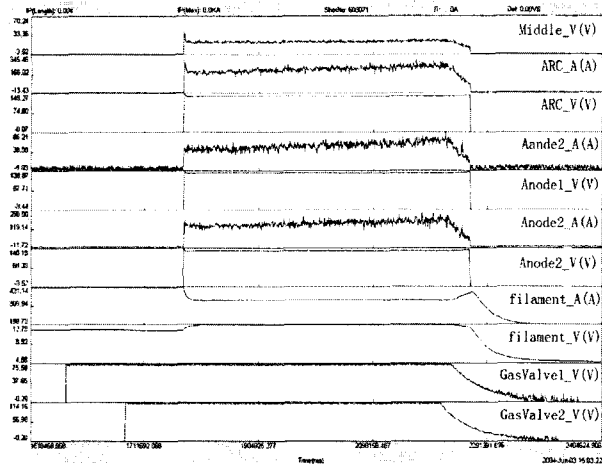


图 5 四灯丝起弧实验波形图
Fig.5 Experimental waveform of arc discharge with four $\phi 1.2\text{ mm}$ filaments.

2.3.3 强弧流放电

强弧流放电，阴极灯丝须提供较多的高能初始热电子，因此用三根 $\phi 1.6\text{ mm}$ 钨灯丝。根据双灯丝和四灯丝起弧实验经验，调节得到强流等离子体放电，主要参数是：灯丝电流 400–440 A；弧压为 130–140 V；磁场电流为 100 A；气阀 1 电压 105–108 V，脉宽 280 ms，提前弧压 50 ms 投入；气阀 2 电压为 115 V，脉宽 290 ms，提前弧压 50 ms 投入。灯丝电流为 440A 的实验波形见图 6，弧电流强度的峰值为 580 A，总脉宽 240 ms，其中包括 150 ms 的放电较为平稳段。实验表明，三根灯丝($\phi 1.6\text{ mm}$)的电子发射能力足可充分电离气体产生等离子体，上述放电参数可得到稳定的强弧流等离子体放电。

2.3.4 长脉冲放电

长脉冲放电是离子源放电实验中重要研究方向。对于双潘宁离子源，在尚无低温泵的情况下，为延长灯丝寿命并维持较好真空状态，采用低弧流放电方式。实验中(三根 $\phi 1.6\text{ mm}$ 灯丝)，在强弧流放电的基础上，主要通过调节灯丝电流、改变进气时序和关闭气阀 2 进气达到长脉冲的目的。图 7 给出了两炮放电重复的实验波形(总脉宽 1000 ms)。此时的灯丝电流为 400 A，弧压为 130 V，磁场电流为 97 A，气阀 1 电压为 105 V，提前 120 ms 投入，气阀 2 关闭。降低灯丝电流、减小进气量，可得到弧电流峰值为 245A 的长脉冲等离子体。

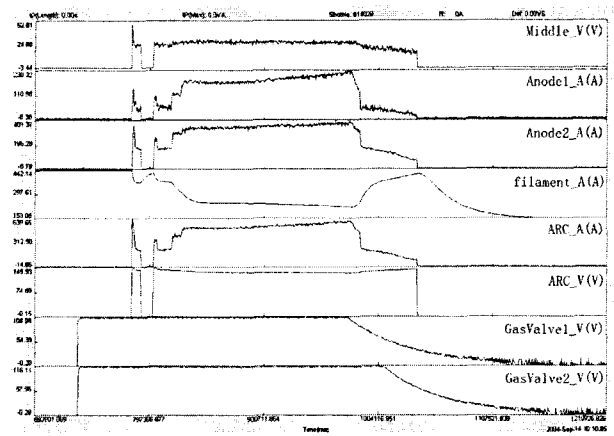


图 6 强弧流起弧实验波形图(灯丝电流 440 A)
Fig.6 Experimental waveform of plasma discharge at filament current of 440 A with three $\phi 1.6\text{ mm}$ filaments.

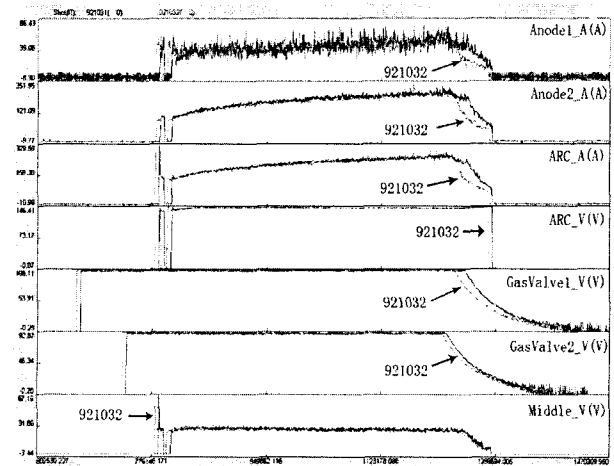


图 7 长脉冲起弧实验波形图
Fig.7 Experimental waveform of long pulse discharge.

当气阀 2 开启时，在降低灯丝电流的同时，通过降低气阀电压来控制进气来达到长脉冲的目的。实验中保持其它参数不变，灯丝电流改为 405 A，气阀 2 电压设置为 90 V，提前 50 ms 进气，得到了

较为稳定的等离子体放电, 实验波形与图 6 相似。开启气阀 2, 弧流有所上升(260 A), 放电脉冲缩短(500 ms)。与气阀 2 未开启相比, 在放电脉宽内弧电流较为平稳, 有利于提高弧品质。

3 结论

在双潘宁离子源上, 采用两种规格的灯丝对离子源进行起弧实验研究。在 $\Phi 1.2$ mm 的双灯丝、四灯丝的不同放电模式下, 得到了高品质高强度的弧流, 为离子源实验运行的参数设置提供了参考。在此基础上, 尝试了 $\Phi 1.6$ mm 的三灯丝起弧实验, 并获得了弧流为 580 A 等离子体放电和 1 s 长脉冲等离子体放电, 为双潘宁离子源进一步调试奠定了基础, 对整个 NBI 系统的运行也具有重要的指导意义。

参考文献

- 1 朱士尧. 核聚变原理, 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1992, 197
- 2 WESSON John. Tokamaks. Oxford: Clarendon Press. (Third Edition). 2004, 593
- 3 CHEN F F. Introduction to plasma physics and controlled fusion. New York and London: Plenum Press. 1983, 45
- 4 张华顺, 编著. 离子源和大功率中性束源. 北京: 原子能出版社. 1987, 394
ZHANG Huahun. Ion source and high power neutral beam source, Beijing: Atomic Energy Publishing House. 1987, 394
- 5 宋士花, 刘智民, 刘胜, 等. 核电子学与探测技术, 2006, 26(1): 122-125
SONG Shihua, LIU Zhimin, LIU Sheng, *et al.* Nucl Electron Detect Technol, 2006, 26(1): 122-125
- 6 陈联, 刘智民, 朱武, 等. 真空, 2003, 40(6): 34-36
CHEN Lian, LIU Zhimin, ZHU Wu, *et al.* Vacuum, 2003, 40(6): 34-36

Arc characteristic of high current duopigatron ion source

HU Chundong ZHANG Xiaodong

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract Effects of discharge regulation parameters and secondary gas input on arc current of a 22-cm duopigatron ion source were studied. Several measures were taken to obtain stable long-pulse arc current of high intensity. The improved ion source is useful for getting high quality arc current in the next step experiment. Besides, it has a significant meaning to improve performance of the ion source, and to realize quasi-steady operation mode of the NBI system.

Key words Arc characteristic, Duopigatron ion source, Arc current, Neutral beam injector

CLC O530, O461.1