

# EAST强流离子源电源系统的初步测试运行

刘智民 胡纯栋 刘胜 蒋才超 宋士花 谢亚红 盛鹏

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘要** 测试 NBI 大功率强流离子源的综合测试台正在建设, 已研制了离子源等离子体发生器电源系统、等离子体电极高压电源及梯度极分压器、抑制极负高压电源等电源系统, 以及高压传输线及缓冲器, 在测试台上开展了对 EAST 中性束注入器第一台兆瓦级强流离子源样机进行整体电源系统测试和离子源起弧放电的初步测试, 完成了离子源电源系统初步性能测试及系统整体联调, 给出了各套电源系统测试运行达到的参数指标, 在兆瓦级强流离子源样机上获得了首次离子源起弧放电的实验结果。

**关键词** 中性束注入器, 强流离子源, 离子源放电

**中图分类号** O4-33

中性束注入(Neutral Beam Injector, NBI)是受控核聚变研究中对等离子体辅助加热的主要手段之一。全超导托克马克装置 EAST 中性束注入器的兆瓦级强流离子源样机, 已完成研制及整机装配, 并在一台小型真空平台上开展了离子源真空检测、冷却水压力测试、电源系统整体测试, 以获取首次离子源起弧放电的实验结果。EAST 装置设计要求的第一条 NBI 加热束线, 需安装两台强流离子源, 运行条件为注入中性束功率 4 MW、能量 50–80 keV、束流 60 A。

为测试和锻炼此类大功率离子源的整体性能, 国内外 NBI 实验室都建立了专用的强流离子源综合测试台<sup>[1-3]</sup>。具有类似实验功能的 EAST NBI 综合测试台正在建设中, 已研制了离子源等离子体发生器电源系统、等离子体电极高压电源及梯度极分压器、抑制极负高压电源等电源系统, 以及高压传输线及缓冲器、大流量冷却循环水系统、中央控制及数据储存系统等附属设备。鉴此, 对该强流离子源样机在真空测试台上进行整体电源系统的测试和离子源起弧放电的初步测试。

## 1 实验装置

该强流离子源样机的设计, 引入了美国通用原子公司(GA)核聚变装置 DIII-D 大功率离子源的初始设计。对该强流离子源样机进行离子源电源系统等离子体放电性能的初步测试回路如图 1 所示。

其由等离子体放电室和引出系统组成。等离子体放电室由无氧铜材料制成, 尺寸为 650 mm×260

mm×300 mm。放电室外围安装 40 组永久磁铁, 以产生会切磁场约束内部等离子体, 每组磁铁的表面测量磁场强度达 0.35 T, 放电室内距离内壁 60 mm 处的磁场强度为 0.002 T。等离子体放电室装有 24 路 U 形钨灯丝, 直径为 1.5 mm, 全部灯丝并联接在同一正负极上。离子源引出系统为等离子体电极、梯度电极、抑制电极、接地电极的缝形引出结构, 各电极由不同孔径的钨管及不锈钢支座制成, 电极内部通冷却水, 离子源引出面积为 120 mm×480 mm, 透明度为 60%。各电极间绝缘件由树脂材料制成。

该测试台的真空系统由 600 L/s 分子泵和 16 L/s 机械泵机组成, 运行时本底真空度达  $10^{-4}$  Pa 量级。实验气体为氢气, 气体供应压力保持在 0.4 MPa。对离子源结构的真空漏率进行检测, 离子源内通压力为 0.2 MPa 的去氧离子循环水, 完成了内部冷却水回路 1 MPa 的静水压力测试。在等离子体放电室接近引出端口插入六路固定的静电探针, 探针由  $\Phi 1.5$  mm 钼丝制作, 探针内部通冷却循环水, 在放电室矩形引出端口的长边各两支, 短边各一支, 用以测量等离子体密度及分布。

对强流离子源样机进行离子源起弧放电测试, 所用电源系统为自制的离子源电源系统。表 1 给出了各套电源的主要设计参数。基于 EAST 超导托克马克稳态运行的物理实验要求, NBI 离子源各套电源运行时间要求按照稳态设计, 以满足 NBI 装置中性束注入实验长脉冲运行的要求。

国家自然科学基金项目(10875164, 11075183)资助

第一作者: 刘智民, 男, 1962 年出生, 博士, 研究员, 现从事托卡马克中性束注入加热研究

收稿日期: 2011-04-12, 修回日期: 2011-07-07

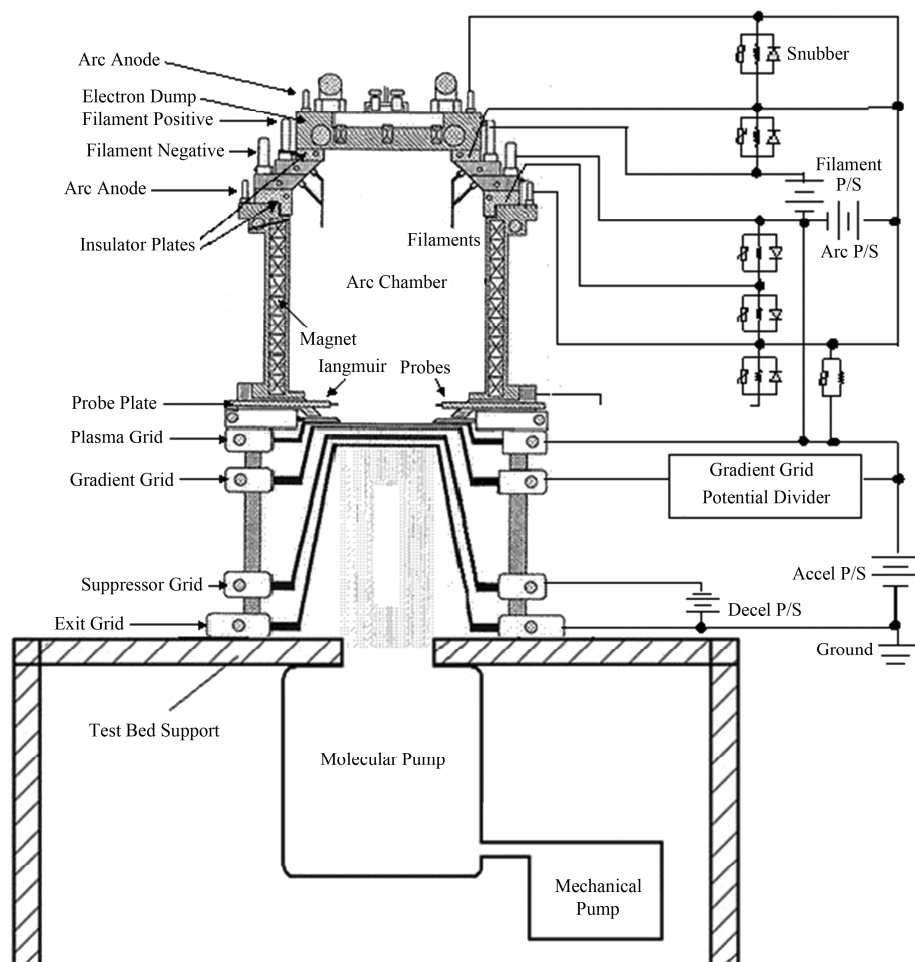


图 1 强流离子源样机起弧放电电源系统及测试台

Fig.1 Schematic of the test bed of the prototype high current ion source with the arc discharge power supply connections.

表 1 NBI 综合测试台各套电源系统的主要设计参数

Table 1 Ratings of the power supplies for the prototype ion source.

	Voltage /V	Current /A	Regulation
Filament PS	0-20	0-5.5 k	3%, V
Arc PS	0-200	0-3 k	1%, V
Bending Magnet PS	0-80	0-600	1%, I
Suppressor PS	0-4 k	0-20	3%, V
Core Snubber Bias PS	0-30	0-150	1%, I
Accelerator PS	0-100 k	0-100	1%, V

\* Gradient Grid Bias: 75%-90% of Accelerator voltage in 1% steps

离子源等离子体发生器电源系统由灯丝电源 (Filament PS)和弧电源(Arc PS)组成,它们运行在等离子体电极电源的高压电位上,所有电力都通过超过 100 kV 绝缘等级的隔离变压器提供。灯丝电源主回路设计为三相相控电源,灯丝负载是由 24 根  $\phi 1.5$  mm 钨丝并联形成,为减小冷灯丝受启动电流的冲击影响,采用延长电压上升时间的方式,最大输出

20 V/5.5 kA,电压稳定度为 3%,稳态运行方式。弧电源对应的是一个非线性负载,易受离子源的工作气体压强、会切磁场、阴极状态以及弧电压等因素的影响,使弧流不易控制,同时影响离子源弧室内等离子体的稳定和均匀分布。为此,弧电源的主回路设计采用三绕组变压器,两组副边相差  $30^\circ$ ,形成 12 脉波整流波形,以满足最大输出 200 V/3 kA

及电压稳定度 1% 的要求。利用朗缪尔静电探针的等离子体诊断原理, 在离子源放电室设置 6 组静电探针, 测量等离子体密度信号反馈控制弧电源输出, 以获得满足强流离子源稳态运行所需的高密度、分布均匀、放电时间长的等离子体<sup>[4]</sup>。为匹配加速器引出电极高压电源的运行, 设计了离子源弧电流输出打坑电路, 在引出电极电源高压启动上升时, 相应地调节弧电流的输出值。在各套放电电源与离子源接线端之间, 设计了由电阻器、二极管、非线性电阻构成的浪涌保护组件, 连接在各套电源端子与金属隔离板中间, 起到均匀分布弧压且吸收浪涌电压的作用。

## 2 实验结果

EAST 强流离子源样机的电源系统测试需进行数项实验。本文主要介绍离子源等离子体放电电源系统的初步测试结果, 以及离子源各套电源的联调结果。对离子源各套电源系统进行假负载满负荷测试, 以检验各电源系统的输出性能及保护功能。图 2(a) 是灯丝电源输出特性波形, 灯丝电压采用了 8 s 的慢启动时间, 以减小启动电流对钨丝的冲击, 通道 CH3 为灯丝电源输出电压波形 (虚线), 输出电压 18 V; 通道 CH2 为灯丝电源输出电流波形 (实

线), 比例为 1500 A/V, 最大输出参数达到 18 V/5 500 A。由图 2(b), 通道 CH3 为弧电源输出电压波形 (虚线), 输出电压 100 V, 通道 CH2 为弧电源输出电流波形 (实线), 比例 750 A/V, 输出电流最大 1800 A, 平顶段电流为 1200 A, 弧电源假负载测试能达到的最大输出参数为 180 V/3 100 A, 弧电源输出脉宽为 30 s。图 3(a) 是对离子源抑制极负电源的测试, 通道 CH1 为电源输出电压 -4 kV (虚线), 通道 CH4 为输出电流约 16 A (实线), 比例为 3 A/1 V。电源输出参数为 -4 kV/16 A, 脉宽 15 s, 其中上升沿 <math><20 \mu\text{s}</math>, 下降沿 <math><5 \mu\text{s}</math>, 这与离子源等离子体电极高压电源的上升及下降性能相一致。图 3(b) 为弧电源打坑电路的弧电流输出波形, 通道 CH1 为编码器输出至 IGBT 的一路驱动信号 (虚线), 约为 11.2 V; 通道 CH2 为弧电源输出电流波形 (实线), 测量比例 750 A/1 V, 弧电流最大下降到约 180 A。设置下降时间为 80  $\mu\text{s}$ , 保持时间 100  $\mu\text{s}$ , 上升时间为 80  $\mu\text{s}$ , 通常要求在上升时间里匹配对应着等离子体电极电源的高压上升沿。由此可见, 这三套离子源电源在假负载测试基本达到了设计指标。根据强流离子源样机的一般调试经验<sup>[5]</sup>, 其初始阶段测试运行典型值对于灯丝电压和弧电压不会高于 10 V 和 100 V。

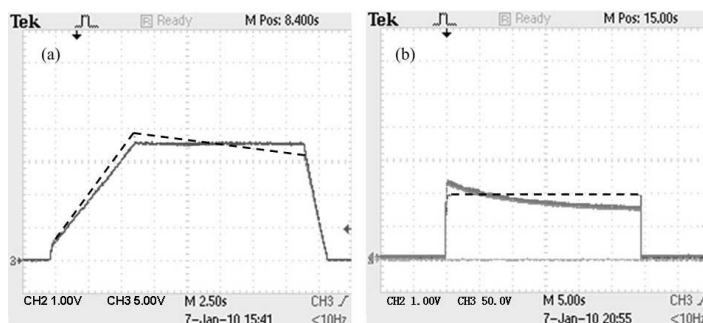


图 2 灯丝电源(a)和弧电源(b)的输出脉冲波形

Fig.2 Output waveform for the filament PS(a) and the arc PS(b).

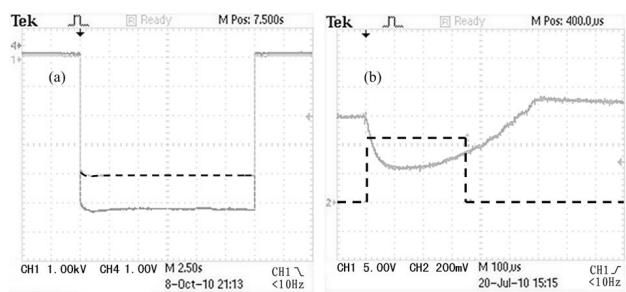


图 3 抑制极电源(a)和弧电源打坑电路(b)的输出波形

Fig.3 Output waveforms for the suppressor PS(a) and the notch circuit of the arc PS(b).

图 4 为获得的离子源等离子体放电波形。该放电参数结果得到了良好的重复。灯丝电压经过约 4 s 的上升期后维持在 8.2 V，灯丝电流达到 2 400 A，进气阀电压设定为 44 V，进气脉宽 4.5 s，在此期间进行了脉宽 5 s 的等离子体放电，弧电压和弧电流分别达到 52 V 和 680 A。由图 4，弧电压和弧电流的输出波形趋于稳定，在此期间生成的等离子体也趋向稳定。具备长脉冲等离子体放电运行是此类兆瓦级强流离子源必须达到的重要性能之一<sup>[6]</sup>，离子源样机需要进一步开展等离子体放电更高参数的测试研究，首先通过对气体进气阀电压、灯丝电压、弧电压以及脉冲时序等参数的调节，以获得离子源长脉冲等离子体放电的测试结果，对于今后大功率 NBI 束线的稳态运行至关重要。

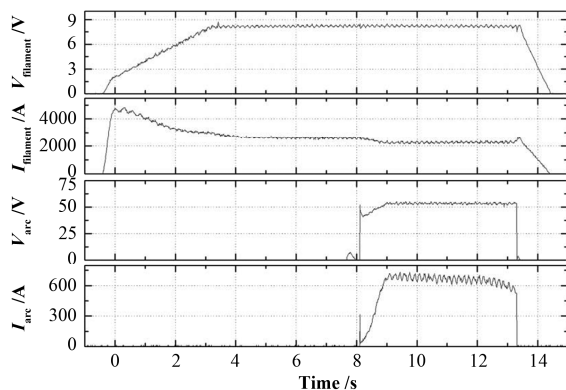


图 4 离子源长脉冲弧放电的波形曲线  
Fig.4 Output waveforms for an arc discharge.

对强流离子源样机的电参数初步测试，还包括离子源各套电源系统的联调测试。这是基于离子源的电气连接回路中，离子源等离子体发生器电源的输出负端是连接在引出电极高压电源的正极输出端上，由此灯丝电源、弧电源以及进气阀电源都运行在等离子体电极电源的高压电位上。初步进行的离子源电源系统联调，是在等离子体电极电源输出 50 kV 高压电位上，进行离子源各套电源系统的联调测试。在图 5 所示的离子源电源系统联调实验中，等离子体电极电压为 50 kV，梯度极分压器电压为 40 kV，抑制极电压 -2.5 kV，灯丝电压 6 V，灯丝电流 2 100 A，弧电压 43 V。实验中等离子体电极高压电源的维持脉宽为 500 ms，初步达到了离子源全套电源系统在高压电位上整体测试的目的，同时也检验了测量与仪控系统满足离子源运行的能力。

### 3 结语

第一台 EAST 兆瓦级强流离子源样机在小型真空平台上完成了初步的离子源起弧放电测试，获得了脉宽 2 s 的 900 A 弧电流以及脉宽 5 s 的 680 A 弧电流<sup>[7]</sup>。离子源全套电源系统包括等离子体发生器电源系统及引出电极电源系统，对此进行了整体联调，初步达到了总控时序统一运行的结果，虽然只是在等离子体电极电源 50 kV 的高压电位上完成的。结果表明，对于进一步开展离子源综合性能锻炼及达到高参数等离子体放电水平是一个良好的开端。今后强流离子源样机以及 EAST NBI 束线的研制及测试工作，将在 NBI 综合测试台上逐渐系统地开展和完成，目前 NBI 综合测试台装置的研制进展正按预定计划循序的进行中。

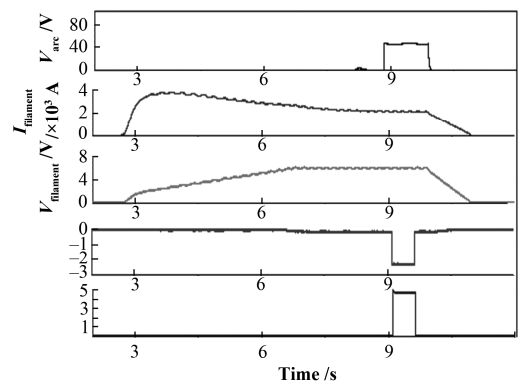


图 5 离子源电源系统的联调测试波形  
Fig.5 Waveforms for the ion source power supplies.

**致谢** 本论文工作是在国家发改委“EAST 辅助加热系统工程”及中科院方向性项目“强流中性束稳态运行的关键技术与物理问题研究”的支持下完成的。作者感谢中科院等离子体物理所 EAST NBI 项目的全体同仁及研究生们给予的有益讨论、支持和协助。

### 参考文献

- Goebel D M. Ion source discharge performance and stability [J]. Phys Fluids, 1982, **25**: 1093–1102
- Chang D H, Jeong S H, Oh B H, *et al.* Arc discharge efficiency of a multi-megawatt long pulse ion source for the KSTAR neutral beam injector [J]. Plasma Sources Sci Technol, 2005, **14**: 336–341
- Asano S, Tsumori K, Okuyama T, *et al.* Effects of filament positions on the arc discharge characteristics of a

- negative hydrogen ion source for neutral beam injector. *Rev Sci Instrum*, 1999, **70**: 2338–2351
- 4 Xie Y H, Hu C D, Liu S, *et al.* Ion source plasma parameters measurement based on Langmuir probe with commercial frequency sweep [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2010, **85**: 64–68
- 5 Ikeda Y, Akino N, Ebisawa N, *et al.* Technical design of NBI system for JT-60SA [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, **82**: 791–797
- 6 Jana M R, Mattoo S K, Chakraborty A K, *et al.* Long pulse characteristics of 5 MW ion source for SST-1 neutral beam injector. *Fusion Eng Des*, 2008, **83**: 729–735
- 7 Hu C D, Xie Y H, Liu S, *et al.* First plasma of megawatt high current ion source for neutral beam injector of the experimental advanced superconducting tokamak on the test bed [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, **82**: 023303 1–4

## Development of the power supplies of the prototype ion source for the EAST

LIU Zhimin HU Chundong LIU Sheng JIANG Caichao SONG Shihua  
XIE Yahong SHENG Peng EAST NBI team

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

**Abstract** For the neutral beam injector (NBI) of the Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), a test stand of a high-current ion source has been in construction. The NBI power supply system includes the plasma generator power supply, plasma electrode power supply, high voltage power divider, negative high voltage power supply, and the transmission lines and the snubber. A multi-megawatt prototype ion source was developed. The arc discharge of the prototype ion source was obtained in the test. The test results for the ion source power supplies and the arc discharge of the ion source are presented.

**Key words** Neutral beam injector, High current ion source, Arc discharge

**CLC** O4-33