

## 中性束注入器 Tank 充气特性对离子源放电的影响

刘智民<sup>1</sup> 刘小宁<sup>1</sup> 陈联<sup>2</sup> 宋士花<sup>1</sup> 刘胜<sup>1</sup> 胡纯栋<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031; 2. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009)

## Influence of Gas Supply to Neutralizer Tank on Discharge Characteristics of Neutral-Beam-Injection Ion Source

Liu Zhimin<sup>1</sup>, Liu Xiaoning<sup>1</sup>, Chen Lian<sup>2</sup>, Song Shihua<sup>1</sup>, Liu Sheng<sup>1</sup> and Hu Chundong<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China;

2. Institute of Mechanism and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China)

**Abstract** Influence of the gas supply into the neutralizer tank of the neutral-beam-injection (NBI) ion source on discharge-arc current was studied with a piezoelectric valve, Model PV10, in the calibration experiment. The results show that the supplied gas quantity depends linearly on the amplitude of the controlling power supply. In the calibration, a few physical quantities of technological interest were calculated also. We can achieve a stable and repeatable discharging plasma-arc current with the maximum pulse width of up to 400 ms, which may significantly improve the injection of high-energy neutral beam into the Tokamak.

**Keywords** Neutral beam injection, Ion source discharge, Gas supply, Neutralizer tank, Piezoelectric valve

**摘要** 利用对 PV-10 型压电阀定标实验,研究了中性束注入器 Tank 内补充气体的参数对离子源放电弧电流的影响,对比压电阀脉冲电源的脉宽和幅值,显示后者对 Tank 内补充气体量具有更显著的线性关系。据此进行的中性束注入器离子源放电实验结果表明,采用压电阀定标值计算获得的参数,可以稳定重复地获得最大放电脉宽达到 400 ms 的等离子体弧电流,为下一步向托卡马克装置注入高能中性粒子束奠定了应用基础。

**关键词** 中性束注入器 离子源放电 气体补充 中性化室 压电阀

中图分类号:TB771.0 532+.26

文献标识码:A

文章编号:1672-7126(2004)05-0355-04

中性粒子束注入器(NBI)是涉及超高真空、低温、精密机械制造、高功率电源工程、高功率诊断、测量和控制等领域的一项综合复杂的前沿技术,它是磁约束受控热核聚变等离子体芯部加热和非感应电流驱动基本而有效的手段<sup>[1]</sup>。近年来,世界上各大聚变实验装置依靠大功率高能中性粒子束注入器来控制等离子体电流的空间分布,改善等离子体的约束和抑制等离子体的不稳定性,获得了高性能等离子体,取得了重要的实验成果。本研究中的中性束注入器系统是 HT-7 可控热核聚变实验装置的关键设备,系统中离子源和中性化室(neutralizer tank,文中简称 Tank)需要一套复杂的充气补气系统。离

子源是产生高能离子束的装置,Tank 是使离子源产生的高能离子束在通过 Tank 气体靶的过程中,基于离子碰撞和俘获的原理转变为中性高能粒子束<sup>[2]</sup>。为了获得一定束流强度的高能离子束,必须对离子源内气体种类和真空度进行精确控制,同时为了使高能离子束在通过 Tank 的过程中,能够最大程度地被中性化,还必须对 Tank 内气体压强进行精确控制。本文报告了 Tank 充气补气系统的设计,通过对 Tank 真空系统的实验测量和分析,得出压电阀充气的工作状态与弧电流参数的直接线性关系,所获得的数据运用在离子源放电中得到了趋于稳定能够重复再现的弧电流波形。

收稿日期:2004-12-20

基金项目:中国科学院十五装备择优资助(中科院 SYKXD04)

\* 联系人:研究员,博导, E-mail: odhu@ipp.ac.cn

## 1 实验方法

实验的离子源和 Neutralizer Tank 是美国普林斯顿大学等离子体物理实验室 (PLT)<sup>[3]</sup> 提供的, 选用的 PV-10 型压电阀由美国 Veeco 公司制作。实验的测试系统示意图如图 1 所示, 补充充气回路包括压电阀, 压电阀脉冲电源, 以及对在 60 kV 高压平台上工作的压电阀电源远程控制和保护等。压电阀基本参数为单次开启脉冲时间小于 2 ms, 阈值电压 40 VDC, 正常工作电压 50 VDC ~ 100 VDC。压电阀脉冲电源工作方波由脉冲周期  $\leq 2$  ms 的脉冲串组成, 波形如图 2 所示<sup>[4]</sup>, 当脉冲宽度大于 2 ms 时, 阀门将暂时关闭。充气阀门及电源将工作在 60 kV 高压平台上, 所有计算机设置的电压幅值和方波脉宽信号, 经过 V/F - F/V 变换由数字光纤传送至高压平台。在 Tank 上测量的真空气压信号, 在高压平台上变换为 0 ~ 10 V 的电平后, 由 V/F - F/V 变换电路通过数字光纤传送至计算机, 同时故障保护信号也直接经过数字光纤传输到控制台<sup>[5,6]</sup>。

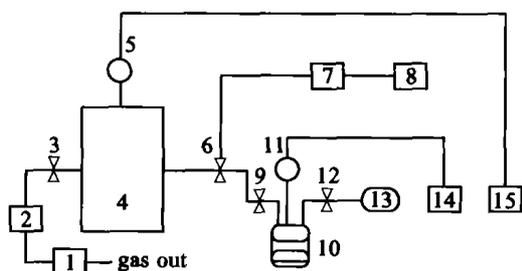


图 1 Tank 真空测量系统

Fig. 1 Vacuum measurement system of the Tank

1. machine pump 2XZ - 8; 2. turbomolecular pump; 3. isolating valve; 4. Tank; 5. gauge DL - 7; 6. piezoelectric valve; 7. piezoelectric valve power; 8. control signal; 9. pin valve; 10. standard case (2.3 L); 11. film gauge CMR271; 12. pin valve; 13. H<sub>2</sub> generator GCD 300; 14. multifunctional vacuumeter TPG256A; 15. compound vacuumeter

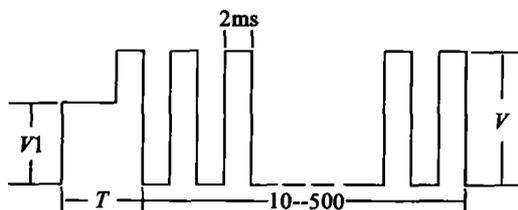


图 2 压电阀电源信号波形

Fig. 2 The wave-form of the piezoelectric valve power

## 2 实验结果及分析

### 2.1 压电阀定标系统设计

压电阀开启时单位时间内流入真空系统内的气体量, 由真空理论计算为  $Q = (P_0 - P_i) \cdot C_p$ , 其中  $P_0$  为标准气体容器内的压力值,  $P_i$  为 Tank 内的压力值,  $C_p$  为压电阀的流导。实验中保持 Tank 内压力在  $10^{-4}$  Pa 数量级以下, 而  $P_0$  维持在 1 个大气压, 那么  $Q$  可以近似为  $Q = P_0 \cdot C_p$ , 这样压电阀的放气量就仅决定于  $C_p$ ; 同时  $C_p$  又取决于供给压电阀的脉冲电源电压幅值和脉宽, 这就可以通过改变脉冲电压的幅值和宽度来标定压电阀的放气量。压电阀放气量标定是通过测量标准小体积容器内的压力变化获得的, 即  $Q = V \frac{\Delta P}{\Delta t}$ , 其中  $V$  为标准小体积容器 (2.3 L) 的总容积,  $\Delta P$  为压电阀开启前后的两次压力差,  $\Delta t$  为压电阀驱动电压信号的脉冲宽度。系统中选用氢气发生源 GCD-300 来制取高纯度的 H<sub>2</sub>, 是由于 NBI 系统的目标是产生高能 H 粒子束; 使用薄膜规 CMR271 测量小体积内的压力, 是考虑这种规是一种绝对规, 所测的压力不随气体种类的变化而变化, 省却了压力转换, 也提高了测量精度; 多功能真空计 TPG256A 可以同时外接 7 种不同型号的规管进行压力测量, 其压力测量范围  $\leq 1.1 \times 10^5$  Pa, 精度为 10 Pa。实验中发现压电阀存在着 45 V 左右的阈值电压和开启时间  $\Delta t$ , 只有脉冲幅值超过阈值电压并且在脉宽  $\Delta t > 10$  ms 的情况下, 开始导致放气量的绝对值有增大的趋势。

### 2.2 压电阀脉宽与进气量关系

首先测量了固定压电阀脉冲幅值而改变脉冲宽度情况下 Tank 内的压力变化。图 3 中脉冲幅值为 80 V, 脉冲宽度从 50 ms 开始, 每次递增 50 ms, 直到

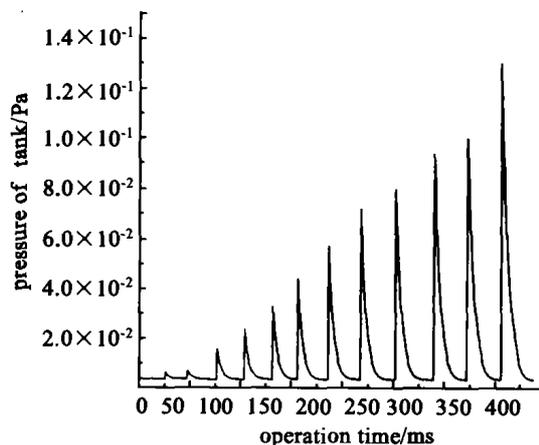


图 3 固定压电阀电源幅值下脉冲宽度与 Tank 内压力的关系

Fig. 3 The relation between pulse width of the piezoelectric valve and pressure in the Tank at the same pulse voltage

最长 600 ms,图中每一个峰代表一次充气过程。根据上述计算方法,可得到图 4 的 Tank 内压电阀进气量与气压值的变化曲线,并且可以观察到在气压值为  $1.0 \times 10^{-1}$  Pa 时,进气量达到  $0.8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

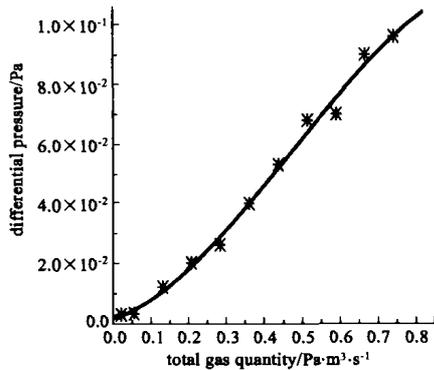


图 4 固定压电阀电源幅值下 Tank 内压力与进气量的关系  
Fig.4 The relation between pressure and gas quantity in the Tank at the same pulse voltage

### 2.3 压电阀幅值与进气量关系

另一种定标是在固定压电阀脉冲宽度下改变脉冲幅值,来测量 Tank 内进气量的变化。图 5 分别对对应脉冲宽度为 300 ms, 500 ms, 600 ms 下,测量 Tank 内压电阀电压幅值与放气量的关系,可以发现它们呈线性递增关系。为了更清楚地说明,把脉冲宽度为 600 ms 时的变化关系列出在图 6。脉冲幅值的变化范围是 53.1 V ~ 84.5 V,没有进行更高脉冲电压的实验,是由于受到真空计 DL-7 测量范围所限制。

在较高脉冲电压情况下,压电阀进气量会很大,将导致 Tank 内的压力超过 DL-7 的测量上限 ( $2.0 \times$

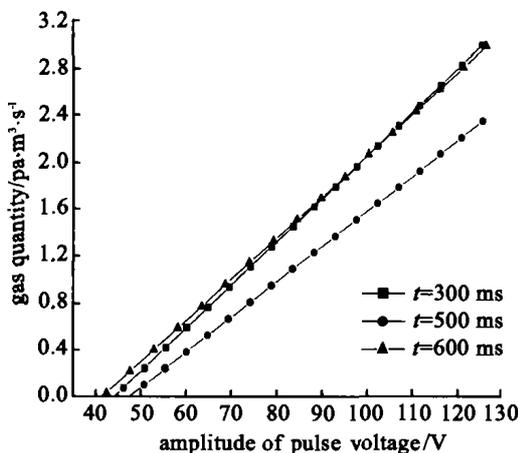


图 5 固定压电阀电源脉宽下脉冲幅值与 Tank 内进气量的关系

Fig.5 The relation between gas quantity and amplitude of pulse voltage at the same pulse width

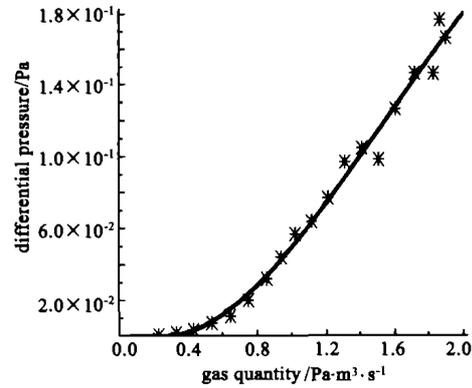


图 6 固定脉宽 600 ms 下 Tank 内压力与进气量的变化  
Fig.6 The relation between pressure and gas quantity in the Tank in pulse width at 600 ms

$10^{-1}$  Pa)。图中可以观察到气压值为  $1.0 \times 10^{-1}$  Pa 时,进气量已达到  $1.4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

### 2.4 实验结果

比较以上压电阀两种不同工作方式的充气特性,可以发现在针对需要大流量补气的实验场合,宜选择后者通过改变电源脉冲幅值达到调节进气量的方法。考虑到这方面因素,在以下实验中就根据压电阀脉冲电压值与 Tank 内充气量的关系,来调节离子源放电弧电流的最佳值。实验时主要参数为:离子源灯丝电流 130A,磁场电流 70A,弧电压预置 120 V,放电前 Tank 内压力保持在  $2.0 \times 10^{-3}$  Pa,设置压电阀电源固定电压为 62 V。

图 7 是一组离子源放电的弧电流波形,可以观察到随着压电阀开启脉宽的延长,Tank 内真空室压力随即升高,同时伴随着弧电流放电时间的逐渐增加,最长达到约 400 ms 左右。当弧电流放电时间达到这一量程后,即便压电阀开启时间继续上升到接近 450 ms,弧电流时间也没有增加,而是仍然保持在

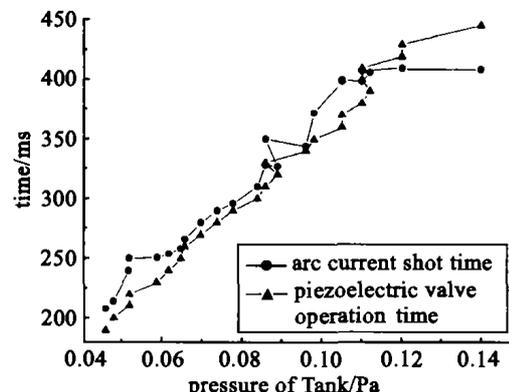


图 7 离子源起弧时间与压电阀脉冲宽度的关系  
Fig.7 The relation between discharging arc current of the ion source and pulse width of the piezoelectric valve

