

气体靶厚度对中性化效率的影响与优化实验

刘 胜 胡纯栋

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 本文对影响中性束注入中性化效率因素之一的气体靶厚度进行了分析,在压力分析基础上对 HT-7 托卡马克诊断中性束装置相关部分进行了工程设计,并建立了一套脉冲充气系统,实现了对系统压力的实时、准确调节,优化了束品质。

关键词 中性化效率, 气体靶, 托卡马克, 诊断中性束

中图分类号 TP273.5, O453

HT-7 托卡马克的主要研究内容是高稳态运行、高参数等离子体放电和等离子体加热等^[1]。作为一个有效可靠的等离子体诊断手段,诊断中性束(DNB)和电荷交换复合光谱已广泛用于测量等离子体旋转速度、杂质离子温度、不同的低 Z 值杂质的浓度和分布以及它们的温度分布、电流密度分布和电子密度波动。诊断中性束主要用于高参数 HT-7 等离子体的诊断,以便通过电荷交换复合光谱获得离子的温度和旋转速度,并研究粒子热输运、径向电场和扰动。

1 诊断中性束简介

诊断中性束系统(图 1)由等离子体源、中性化室、偏转磁铁、功率测量靶、离子吞噬器、真空室和低温系统等组成。等离子体源为一个配备有永久

磁铁的内径 0.264 m 的圆桶形离子源,有 4 个球形截面边界水冷的电极,每个电极上有 61 个圆形小孔。中性化室有水冷却与磁屏蔽,有一个独立的进气口以调整中性化效率,未被中性化的带电粒子被磁场偏转到平板吞噬器上。一个可移动的铜功率测量靶带有呈十字形排列的 17 个热电偶,对称地放置在靶板的背面,靶板距离加速电极约 1.45 m。可以通过在靶板上的直径为 2 mm 的小孔测量束流的绝对功率密度分布,以获得束功率和导流系数。HT-7 诊断中性束的最大中性束功率 150 kW,最高能量 50 keV,最小束斑直径 5 cm。通过诊断中性束与托卡马克等离子体的相互作用,进行电荷复合、交换光谱测量及等离子体的离子密度时空分布等,为等离子体提供可靠的诊断信息^[2]。

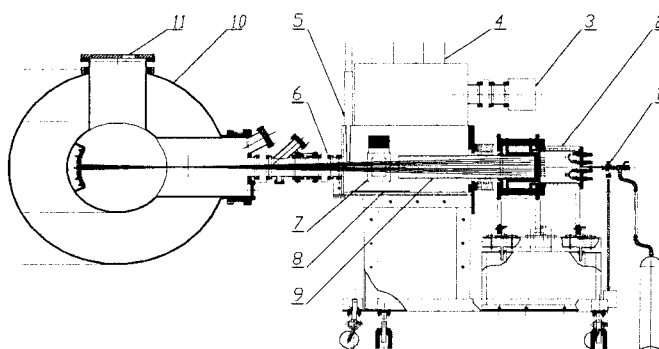


图 1 诊断中性束系统

1. 针阀, 2. 离子源, 3. 涡轮分子泵, 4. 低温吸附泵, 5. 功率测量靶, 6. 漂移管道
7. 偏转磁铁, 8. 离子吞噬器, 9. 中性化室, 10. 托卡马克, 11. 光谱观察窗

Fig.1 The diagnostic neutral beam system

1. Needle valve, 2. Ion source, 3. Turbo molecular pump, 4. Cryopump, 5. Power-measuring target

6. Drift conduit, 7. Bending magnet, 8. Ion dump, 9. Neutralizer, 10. Tokamak, 11. Spectrum observing window

国家自然科学基金(10575105)资助

第一作者: 刘胜, 男, 1972 出生, 1997 年于中国科大获专科学历, 从事中性注入控制系统的设计和相关实验研究

收稿日期: 2007-06-20, 修回日期: 2007-10-29

2 影响中性化效率因素浅析

中性化室的气体靶通常定义为:

$$\pi = \int_0^L n_g(x) dx \quad (1)$$

其中, $n_g(x)$ 为中性化室内气体密度, L 为中性化室的长度。在 高能离子束的中性化过程中, 气体靶厚度是影响中性化效率的一个重要因素, 不同的气体靶厚度通常对应着不同的中性化效率。氢离子束通过 H_2 靶的过程中会碰撞生成 H^+ 、 H 、 H^- 等高能粒子, 电荷状态为 j 的束流相对成分 F_j ($j=1, 0, -1$) 随靶厚 π 的变化可用下列微分方程组描述:

$$\begin{cases} \frac{dF_0}{d(\pi)} = \sigma_{10}F_1 - (\sigma_{01} + \sigma_{0-1})F_0 + \sigma_{-10}F_{-1} \\ \frac{dF_1}{d(\pi)} = -(\sigma_{10} + \sigma_{1-1})F_1 + \sigma_{01}F_0 + \sigma_{-11}F_{-1} \\ \frac{dF_{-1}}{d(\pi)} = \sigma_{1-1}F_1 + \sigma_{-10}F_{-1} - (\sigma_{-11} + \sigma_{-10})F_{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $F_0 + F_1 + F_{-1} = 1$ 。 σ_{ij} ($i, j = -1, 0, 1$) 表示 i 种电荷状态的粒子与 j 种电荷状态的粒子间的碰撞截面^[3]。 F_j 的值决定于在电荷转移碰撞过程中生成 j 种电荷态高能粒子及其碰撞中消亡的高能粒子两个过程的总效果。当气体靶厚增加到一定值以后, 出现生成与消亡两个过程的动态平衡, F_j 将不再随 π 的变化而变化, 这种气体靶叫平衡靶。初始束为 H^+ 时 $F_0(\pi)$ 不出现极值, 只是当 $\pi \rightarrow \infty$ 时 $F_0(\pi) \rightarrow F_0^\infty$, 常取 $0.95F_0^\infty$ 所对应的靶厚作为最佳靶厚:

$$F_0(\pi_{opt}) = 0.95F_0^\infty \quad (3)$$

诊断中性束注入器采用的是初始束为 H^+ 高能正离子束引出中性化加热, (1) 式中的六个碰撞截面有些可忽略不计, 忽略负离子成分就可得:

$$F_i(\pi) = F_j^\infty + N(i, j) \exp[-(\sigma_{10} + \sigma_{01})\pi] \quad (4)$$

当初始束为 H^+ 时有:

$$F_0(\pi) = F_1^\infty [1 - \exp(-\pi(\sigma_{01} + \sigma_{10}))] \quad (5)$$

$$F_1(\pi) = F_1^\infty + F_1^\infty \cdot \exp(-\pi(\sigma_{01} + \sigma_{10})) = 1 - F_0(\pi) \quad (6)$$

$$(5)、(6) \text{ 式中, } F_1^\infty = \frac{\sigma_{01}}{\omega_{10} + \sigma_{01}}。$$

从中性化效率 $\eta = \frac{F_0(\pi)}{F_0^\infty}$ 可以看出, 在一定范

围内气体靶厚度越大中性化效率就越高。由于中性化室长度一定, 要求中性化室内的压强能够尽可能高一点。另一方面, 从中性化室出来的高能中性束在经过主真空室和漂移管道的过程中要发生再电离, 可见增加气体靶厚与减小再电离损失是相互矛盾的。这样, 在中性化室进气口必须设计一套补充进气系统, 使系统在中性束引出过程中在中性化室内有满足要求的气体靶厚度; 同时在条件允许的情况下尽可能地增大主真空系统的抽速, 以提高主真空系统和漂移管道内的真空度。

3 漂移管道束功率的测量和补充进气系统的建立

3.1 漂移管道与束功率测量

漂移管道是 DNB 装置的主要组成部分之一, 位于中性束注入器真空室和托卡马克真空室之间, 承担着完成两个真空室的真空连接与断开、实现两个不同真空室的真空度匹配以及保证托卡马克装置与 DNB 的电位隔离。结构如图 2。漂移管道总长 0.713 m, 是在满足诸多部件功能的情况下的最短设计, 尽量满足束斑传输, 并减小束沿途的再电离损失。如图 2 所示, 从光谱观察窗口倾斜 50° 逆向观察可得到束线的蓝移光谱信号。束线在经过光谱观察路径后被功率测量靶 7 拦截。功率测量靶的热量通过传导传热传递到水冷板。利用测量靶拦截大功率中性束流使之轰击到功率靶表面, 引起靶面温度上升, 通过热传递和对流换热, 将靶板的热量传递给冷却水带走。忽略其它效应, 假设热量全部被冷却水带走, 则通过测量靶板进出口水的温差来计算束流功率:

$$pt_B = cm \cdot \Delta T = c\Delta T \cdot \rho V = c\Delta T \cdot \rho \cdot q_v t$$

$$p = \frac{c\Delta T \rho q_v t}{t_B}$$

式中, p 为束功率(W), c 为冷却水的比热(J/kg.K), ΔT 为冷却水的温差(K), ρ 为冷却水的密度(kg/m³), q_v 为水流量(m³/s), t_B 为束的脉宽(s), t 为束脉冲间隔内冷却水对靶的冷却时间(s)。

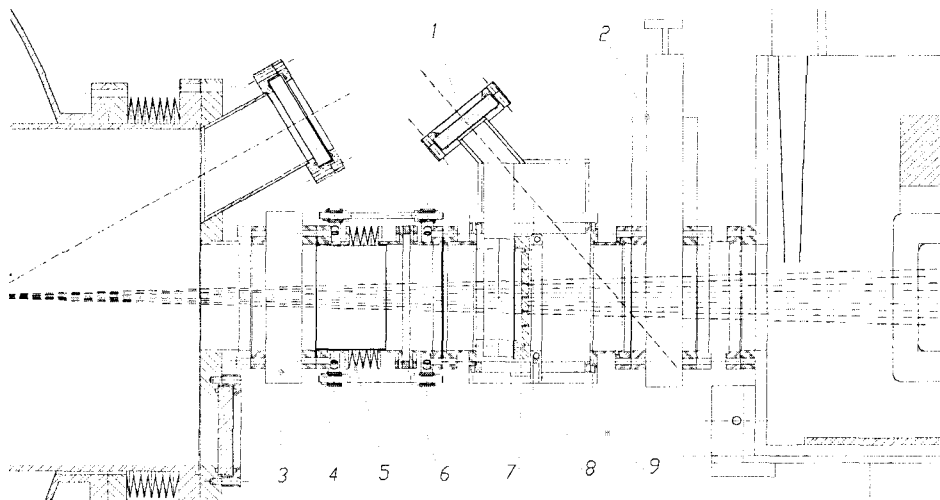


图 2 漂移管道结构

1 光谱窗口, 2、3 插板阀, 4 支撑框架, 5 波纹管
6 陶瓷绝缘, 7 功率测量靶, 8 水冷板, 9 漂移管道支撑

Fig.2 Structure of the drift conduit

1.Spectrum observing window, 2,3 .Gate valve, 4. Support frame, 5.Corrugated pipe
6.Ceramic insulation, 7.Power-measuring target, 8.Water-cooling plate, 9.Drift conduit support

3.2 补充进气系统

高能离子束在通过中性化室气体靶的过程中, 基于离子碰撞和俘获的原理转变为中性束。为获得一定束流强度的高能离子束, 须对离子源内的气体种类和真空度进行精确控制^[4], 为使高能离子束在中性化室中能最大程度地被中性化, 也须对中性化室内的气体压强进行精确控制。为此, 离子源和中性化室均设计有充气系统。离子源进气通过马达机械调节针阀孔径来实现, 而中性化室补充充气采用 MV-112 型压电晶体阀门进行。MV-112 型压电阀门由两块压电材料组成, 其基本参数为: 阀门全开时间小于 2 ms, 阀门阈值电压为 35 V, 正常工作电压 $V_{\text{gas}} = 40 \sim 100 \text{ VDC}$ 。

开启压电阀门须用直流脉冲电压驱动, 其方波脉冲电源的主要指标为电压范围 0~100 V, 方波是由脉冲周期 $\leq 2 \text{ ms}$ 的脉冲串组成的, 占空比为 50%, 该电源具有开关量门控输出。这样即使充气阀门及阀门电源工作在离子源高压平台上, 通过计算机设置的电压幅值和方波门控电平信号, 也可经过线性光纤传送到高压平台^[5]。

4 优化实验

通过栅电极系统加速并以会聚的方向引出离子

源的高能离子束, 在中性化室内与气体靶进行电荷交换而被中性化, 成为诊断中性束。未被中性化的离子被偏转磁场偏转, 形成会聚的高能中性束, 通过漂移管道, 注入高温等离子体中。

在炮号为 51019 和 51020 的相邻两炮中, 离子源放电与加速电压等电参数几乎完全相同, 唯一不同的是中性化与否, 它们的放电实验波形如图 3 所示。51020 炮在束引出时投入了中性化室进气, 增加了气体靶厚度。利用束流功率测量板热量计, 通过铜靶上热电偶的测量得到的温升变化, 可得到诊断中性束在注入到托卡马克前的这两炮的束流功率及束流剖面, 也可看出中性束功率分布的不同。图 4 给出了束水平方向温升的剖面分布。

5 结论

(1) 在介绍诊断中性束装置的基础上, 简单分析了影响中性化效率的因素, 实际上中性化效率还与其它众多因素有关, 在一定条件下, 增加气体靶厚度, 有利于提高中性化效率。

(2) 建立了漂移管道束功率测量与中性化室补充进气系统, 减小了束的再电离损失和提高了中性化效率, 使中性束的输出功率有所增加。这样就为以后对束品质进行细致调节提供了一种方法和手段, 达到了预期的目标。

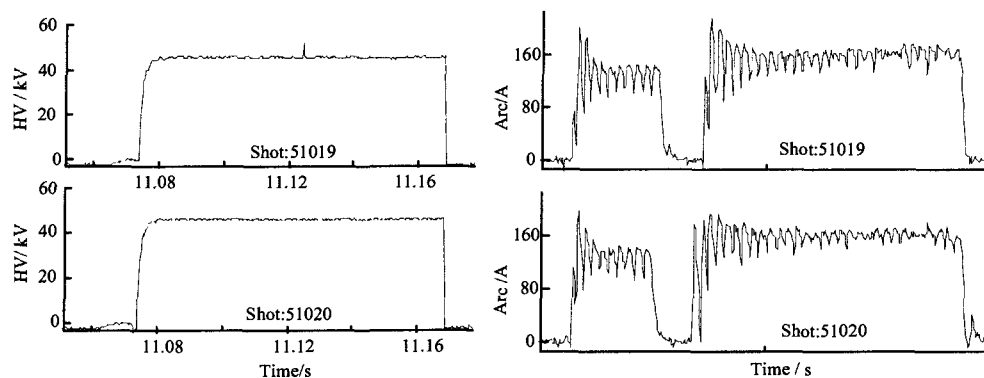


图 3 两炮放电引出波形

Fig.3 Waveforms of the two shots' discharge

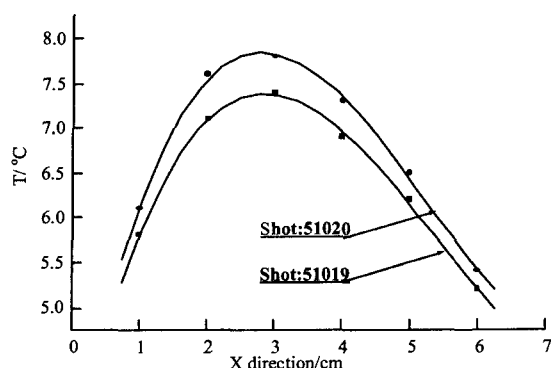


图 4 X 方向束流靶温升剖面分布

Fig.4 Cross-section profiles of the target temperature rise along x direction

参考文献

- 胡立群, 张晓东, 姚若河. 核技术. 29(2):149-152
HU Liqun, ZHANG Xiaodong, YAO Ruohu. Nuclear Techniques. 29(2): 149-152
- 刘胜, 宋士花, 刘智民, 等. 微计算机信息, 2005, 21(12): 4-6
LIU Sheng, SONG Shihua, LIU Zhimin, et al. Control & Automation. 2005, 21(12): 4-6
- 张华顺. 离子源和大功率中性束源, 北京, 原子能出版社. 1987, 27-36
ZHANG huashun, Ion source and high power neutral beam source. Beijing, Energy Publishing House. 1987, 27-36
- 刘胜, 汪永军, 宋士花. 计算机测量与控制, 2005, 13(5):437-439
LIU Sheng, WANG Yongjun, SONG Shihua. Computer Measurement & Control. 2005, 13(5):437-439
- 刘胜, 胡纯栋, 陈开云等. 核电子学与探测技术, 2006, 26(4): 478-480
LIU Sheng, HU Chundong, CHEN Kaiyun, et al. Nucl Electron Detect Technol. 2006, 26(4): 478-480

Effect of the thickness of gas target on neutralization efficiency and the optimization experiment

LIU Sheng HU Chun-dong

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

Abstract This article analyzes the thickness of gas target, which is one of the factors to affect the neutralization efficiency of the neutral beam injection, and carries on the engineering design of the correlation parts of the diagnostic neutral beam injector on HT-7 Tokamak using the pressure analysis. A set of impulsive gas charge system is also established to realize accurate and real-time adjustment for the system pressure, and to optimize beam quality.

Key Words Neutralization efficiency, Gas target, Tokamak, Diagnostic neutral beam

CLC TP273.5, O453