

HT-7 质能分辨电荷交换中性粒子分析

刘胜侠

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(1997 年 10 月 30 日收到; 1997 年 12 月 19 日收到修改稿)

一台新的 10 道电荷交换中性粒子能谱仪已用于 HT-7 托卡马克装置等离子体测量. 它具有磁场和电场, 且在能量 0.2—50 keV 范围进行了标定. 新的能谱仪对于电荷交换粒子测量既能质量分辨, 又可能量分析, 还能提供空间多点扫描. 在欧姆加热氘放电期间, 进行了较大角度范围内的径向扫描离子温度测量, 得到了 HT-7 托卡马克离子温度的时间和空间分布.

PACC: 5200; 5270

1 引 言

随着核聚变研究的发展, 等离子体的种类不断增加, 除了氢等离子体以外, 还有氘氚等离子体. 放电类型也由单纯的欧姆加热向多种辅助加热的方向发展, 以寻求提高等离子体的参数. 托卡马克实验通常采用中性束注入加热^[1], 把高能中性氢束注入到氘等离子体里; 或者在氘等离子体里包含少量的氢用离子回旋共振频率方法^[2]加热等离子体. 在这类实验中往往是氢氘混合等离子体, 有两种不同质量的离子存在, 而且还会产生一些超热离子, 因此对于研究等离子体离子参数变化的电荷交换中性粒子能谱仪就提出了更高的要求. 它不仅能够在较宽的能量范围内研究离子的能量分布, 而且要能区分出不同质量的粒子, 同时还要研究离子温度的时间过程及其空间分布. 为了实验的需要, 先后发展了质能分辨中性粒子分析器, 如 JFT-2, PLT^[3,4]等.

HT-7 装置的物理实验参数高, 运行方式比较多, 如离子回旋共振频率加热; 低杂波电流驱动; 电子回旋与离子回旋频率共同加热等. 为了更好地研究超导托卡马克多种加热条件下等离子体的离子参数, 近年来我们建立了一套质量分辨, 能量分析达 50 keV 的中性粒子测量系统. 它可同时或分别测量来自等离子体的氢和氘粒子, 在等离子体小截面进行空间扫描. 本文报道 HT-7 装置上的质能分辨中性粒子分析器的工作原理及其测量系统; 介绍近期应用质能谱仪在 HT-7 氘等离子体放电实验中测量的离子能谱和所得离子温度时间和径向分布等实验结果.

2 HT-7 中性粒子能谱仪实验安排

HT-7 是一个大半径 $R=1.2$ m, 小半径 $a=0.3$ m, $B_t=2.5$ —3 T 的超导装置. 它具有内外真空室, 低温超导纵场线圈放在内外真空室之间, 因此测量窗口一般离等离子体中

心较远.根据所给窗口位置,中性粒子能谱仪的实验安排如图 1.中性粒子能谱仪的几何中心相对等离子体中心下降 100 mm,测量等离子体中心弦时能谱仪向上偏 5.5°,以空间多点连续扫描的方式工作.

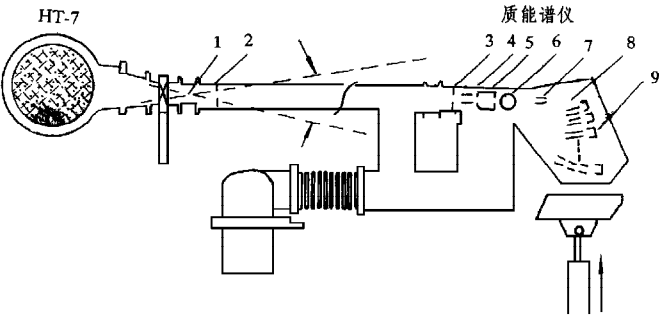


图 1 中性粒子能谱仪实验排布图 1 为法兰;2 为前狭缝;3 为入射狭缝;4 为偏转板;5 为剥离室;6 为磁分析器;7 为法拉第筒;8 为 C₁—C₁₀电分析板;9 为 D₁—D₁₀离子探测器

由于中性粒子能谱仪在测量时直接和装置真空室连通,因此配备了一套高真空抽气系统.真空机组放在测量窗口下方,它与能谱仪之间采用软管连接,扫描测量时能谱仪上下移动而抽气机组不动,使扫描带动重量轻、操作灵活、空间分辨好.

质能谱仪由偏转板、剥离室、磁场线圈、电分析器以及信号探测器组成.来自等离子体的中性粒子进入谱仪后,通过偏转板清除掉带电离子,进入充有氮气的剥离室,在剥离室里转换成带电离子后进入磁场进行分析.在磁场里离子的偏转角度与离子的动量有关,调节磁场线圈电流的大小,选取合适的磁场强度,使质量为 M 能量为 E 的粒子偏转到某一道电分析器的入口.10 道电分析器能同时测量 10 种不同能量的离子,每道的能量分辨率 $\Delta E/E < 30\%$,可以有效地分辨氢和氦离子.经过质量和能量分析的离子将分别进入 10 个离子探测器(B3Y-6 通道管)进行计数.加在分析器上的电压大小决定分析粒子的能量范围,分析电压与磁场电流之间符合如下关系: $I = C \sqrt{AU}$,其中 A 为以原子单位表示的离子质量, C 为标定常数.根据实验需要选择适当的分析电压和磁场电流,可以在能量 0.2—50 keV 之间测量氢和氦的能谱.

数据测量和采集如图 2 所示.实验中磁场加上电流,探测器和偏转板上分别加上高压,探测器输出的负脉冲经前置放大器放大成 0.6 V, 20 ns 负的方脉冲;送到主放大器进一步放大后,经长电缆送到光电隔离整形器,形成 TTL 电平以后送到带缓存的 CAMAC 计数器,计数时间最小为 2 ms.每个间隔的计数先放入缓存器,每次放电结束数据送到主计算机 VAX-6400.一台 IBM PC 机与计算机联网进行适时数据处理.两次放电之

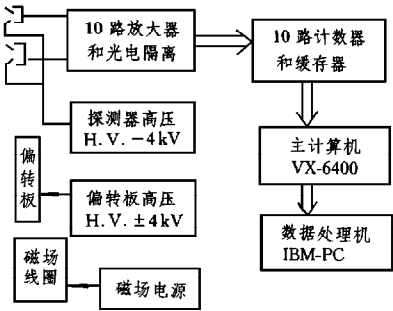


图 2 数据测量和采集系统

间可以及时得到离子能谱以及离子温度的时间分布. 多次重复放电可以测量离子温度的径向分布.

3 离子温度的测量

对于 HT-7 欧姆加热氖放电, 在等离子体电流 $I_p = 150\text{—}180\text{ kA}$, 纵场 $B_t = 1.8\text{—}2.0\text{ T}$, 平均电子密度 $n_e = (1.5\text{—}2.5) \times 10^{13}/\text{cm}^{-3}$ 的放电条件下, 用 10 道中性粒子能谱仪测量了等离子体的离子能谱, 研究了离子温度的时间和径向分布.

从等离子体里逃逸的快中性原子通过充氮气的剥离室, 剥离室气压一般保持在 $1.2 \times 10^{-2}\text{ Pa}$. 实验中通过调节立体角以保证谱仪的计数率不超过每秒 10^5 . 能谱仪可以从 θ 为 -10° 到 $+15^\circ$ 范围内扫描测量, 因此在相同的放电条件下可以得到不同 θ 弦上的中性粒子通量和离子能量分布.

来自等离子体的中性粒子能量分布, 忽略衰减效应可用下式表示^[5]:

$$d\Phi(E)/dE = 4/\sqrt{2\pi M_i} \int \Delta\Omega/4\pi AN_0(r) N_i(r) \sigma_{cx}(E) E dr \times 1/T_i^{3/2} \exp[-E/T_i],$$

A 为谱仪在观察方向上所看到的等离子体平均截面; $\Delta\Omega$ 为谱仪的有效接收立体角. 等离子体的离子温度从能谱的半对数斜率推出.

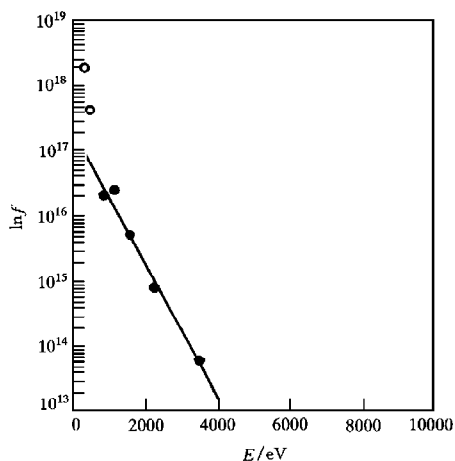


图 3 中性粒子的能量分布

图 3 示出等离子体中心弦在放电 200—240 ms 期间测量的半对数坐标图上的离子能谱. 一般等离子体中心的离子温度由能谱中能量 E 大于 $(2\text{—}3) T_i(0)$ 的高能部分实验点拟合直线的斜率决定. 因为高能部分的快中性原子主要来自等离子体中心, 而图 3 中偏离直线的低能数据点是等离子体边缘中性粒子的贡献. 从能量 $0.8\text{—}3.6\text{ keV}$ 之间能谱拟合直线的斜率推出等离子体中心氖离子温度约为 400 eV . 每次放电过程可以测量许多个 Δt 间隔的上述能谱, 分别得到不同放电时刻的中心离子温度, 图 4 示出一次放电得到的中心离子温度随时间的变化. 由于在等离子体电流上升和下降阶段许多放电参数不稳定, 温度测量误差较大, 因此中性能谱

分析只研究了电流平顶段离子温度的变化. 测量结果表明在实验条件比较稳定的情况下中心离子温度变化很小, 并且与 Artsimovich 的实验定标率^[6]计算结果在误差范围内基本相符.

实验期间在放电参数保持重复的条件下, 测量了不同 θ 角弦上的离子温度. 通过扫描设备从等离子体中心弦开始, 每次放电 θ 角改变 3° 向着等离子体边缘扫描. 图 5 示出不同 θ 角弦上的离子温度在放电 200—400 ms 期间的变化. 前几次放电重复性较好, 其中 $\theta = 9^\circ$ 弦的边界离子温度在后期因为密度有所增加, 所以温度稍有上升. 根据图 5 所示离子

温度测量值大小,得到当 $t=200\text{--}240\text{ ms}$ 期间的离子温度径向分布示于图 6. 从图 6 可见虽然测量点较少,但测量值的大小和变化趋势与理论曲线非常符合.

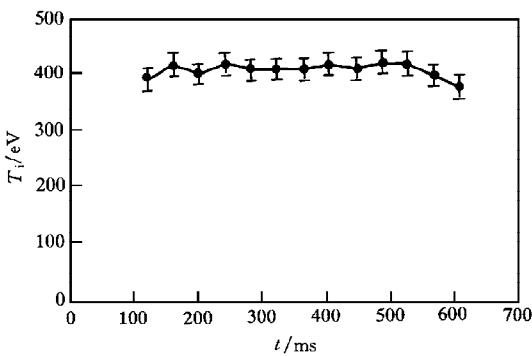


图 4 中心离子温度随时间的变化

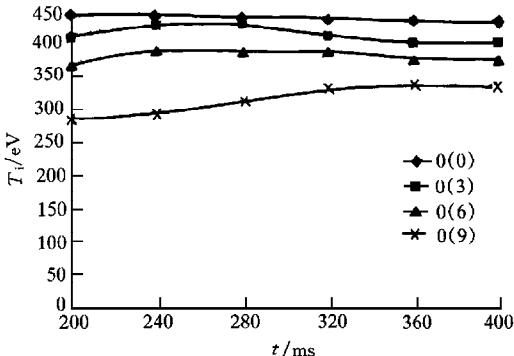


图 5 不同弦上离子温度随时间的变化

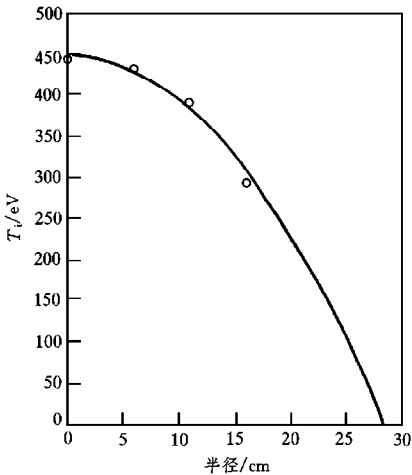


图 6 离子温度的径向分布 ($t=200\text{--}240\text{ ms}$) $\circ$ 为测量值;
——为假设离子温度分布符合公式 $T_i(r)=T_i(0)(1-(r/a)^2)$ 的
计算结果, $T_i(0)$ 为等离子体中心的离子温度, $T_i(r)$ 为半径为 r
处的离子温度, a 为等离子体半径

4 结果与讨论

HT-7 托卡马克实验期间应用质能分辨中性粒子谱仪测量了等离子体的离子温度,得到离子温度的时间和径向分布. 离子温度的径向分布测量对于等离子体研究会有很大帮助,尤其对于研究各种辅助加热引起的离子温度分布变化非常重要.

由于能谱仪采取了磁分析和电分析两种方法,大大降低噪声水平;测量系统增加了光

电隔离,减少了测量过程中的干扰,在电流平顶段的本底噪声一般可以忽略.又因为 HT-7 托卡马克放电时间较长,选取计数时间 Δt 较大,每个 Δt 有足够多的计数,只要一次放电测量即可得到离子温度随放电时间的变化.

本工作机械设计由沈玉琴完成,数据处理的软件得到姚爱玲的帮助,工作中得到方自深、秦品健等同事的关心和支持,实验组提供了良好的工作条件,在此一并感谢.

- [1] D. W. Swain, M. Murakami, S. C. Bates *et al.*, *Nucl. Fusion*, **21**(1981), 1409.
- [2] Equipe TFR, in Heating in Toroidal Plasmas, Commission of the European Commun., Brussels(1982), p. 225.
- [3] T. Miura, H. Matsumoto, H. Kimura *et al.*, *Nucl. Fusion*, **24**(1984), 211.
- [4] D. Mueller, G. W. Hammett, D. C. McCune, *Rev. Sci. Instrum.*, **57**(1986), 1794.
- [5] H. Zushi, Y. Nakashima, K. Noumi *et al.*, *Nucl. Fusion*, **22**(1982), 1342.
- [6] L. A. Artsimovich, *Nucl. Fusion*, **12**(1972), 215.

MASS RESOLVING CHARGE-EXCHANGE NEUTRAL PARTICLE MEASUREMENT ON HT-7 TOKAMAK

LIU SHENG-XIA

(*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031*)

(Received 30 October 1997; revised manuscript received 19 December 1997)

ABSTRACT

A new mass resolving neutral particle analyzer was installed on the HT-7 tokamak. The analyzer is constructed with electric and magnetic fields and is calibrated over an energy range of 0.2—50 keV. The new analyzer provides a wide energy range, mass resolving, perpendicular scanning charge-exchange diagnostic. In Ohmic-heated deuterium discharges, the analyzer provides the measurement of deuterium ion temperature over a range of viewing angles, and radial ion temperature profiles can be obtained.

PACC: 5200; 5270