

HT-6M 中性注入加热电荷交换能谱分析

刘胜侠

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(1994 年 11 月 11 日收到)

用电荷交换中性粒子能谱分析的方法, 研究了 HT-6M 托卡马克中性注入加热期间的氢离子能谱, 得到了离子温度的增加. 测量结果与实验定标律的估算在误差范围内相符; 并与根据 Fokker-Planck 方程计算的注入过程中的离子能谱和温度变化进行了比较.

PACC: 5270; 5240M; 5250

1 引 言

在受控聚变领域里, 托卡马克是利用磁约束高温等离子体实现受控聚变反应的一种装置. 几十年来各国围绕着托卡马克高温等离子体展开了各种各样的卓有成效的研究工作, 为了深入了解高温等离子体内部状况, 采用各种技术和设备进行诊断测量, 其中测量等离子体发射的电荷交换中性粒子的能谱来确定离子温度是最基本也是最重要的诊断方法之一.

在聚变研究中, 离子温度的提高是实现热核反应的重要条件之一, 近年来托卡马克实验已普遍开展高功率辅助加热的研究, 试图寻找提高离子温度的方法, 如中性注入(NBI)离子回旋共振加热(ICRF)等, 都直接把能量传给离子. 中性注入是把高能中性粒子注入到等离子体中, 加热离子, 引起分布函数非麦克斯韦分布, 增加高能离子, 从而增大聚变反应率. 为了了解中性注入加热的过程, 得到加热效率, 国外许多装置都开展了实验和理论研究工作. 如 ORMAK, TFR^[1,2]等, 他们利用中性注入提高离子温度都取得了明显的效果.

本文介绍了在 HT-6M 托卡马克上首次中性注入实验期间, 利用中性粒子能量分析方法研究了离子能谱的变化, 得到了注入加热的效果, 并对注入过程中的离子能量分布进行了理论计算和分析.

2 实验安排与方法

中性粒子能谱仪与 HT-6M 的联接如图 1 所示, 中性粒子能谱仪在水平方向对准等离子体中心, 谱仪与装置之间由管道联接. 能谱仪包括剥离室, 45°平行板能量分析器和离子探测器.

谱仪工作时用 450 L/s 抽速的涡轮分子泵作为主泵, 8 L/s 直联式机械泵作为前级泵

抽气,本底真空抽至 2.6×10^{-4} Pa,剥离室充氢气,气压维持在 8×10^{-1} Pa,在剥离室充气的条件下,谱仪本底真空度优于 4×10^{-3} Pa,保证探测器的工作条件.

来自等离子体内部的快中性原子,通过剥离室转换成带电离子,离子进入能量分析器进行能量分析,在分析器里离子根据能量大小具有不同的轨迹,到达与能量有关的 10 个不同出口,在出口处由通道式电子倍增器记录.通道式电子倍增器用于离子测量以脉冲计数方式工作.

电子倍增器输出的脉冲经如下方式记录:

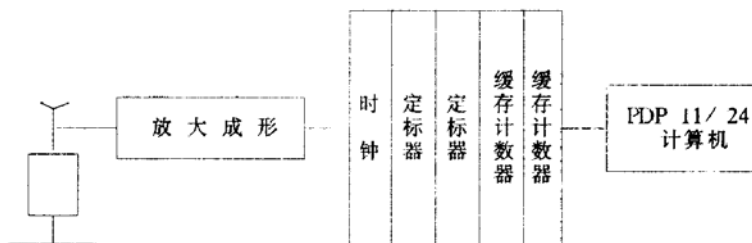


图 1 谱仪与 HT-6M 联接示意图

信号经放大器放大整形为 3.5VTTL 电平,通过同轴电缆送入带缓存的 CAMAC 多路计数器,计数器与计算机 PDP-11/24 相联,一个标准时钟控制 10 路计数器在 5 ms 的间隔内累计计数.两块定标器可以预选不同的计数间隔和缓存器的取数时间(一般计数选 5 ms,取数选 0.2 ms)每个间隔结束,数据送入缓存器,每次放电结束,数据送入主计算机.

图 2 是每次放电自动显示的十道原始信号,其中第 1 道为标准的时钟计数,作为参考.每次放电期间,每道最多可采集 50 个数据点,对应放电时间 250 ms.每道对应的能量显示在图 2 上,从 0.3–1.5 keV.

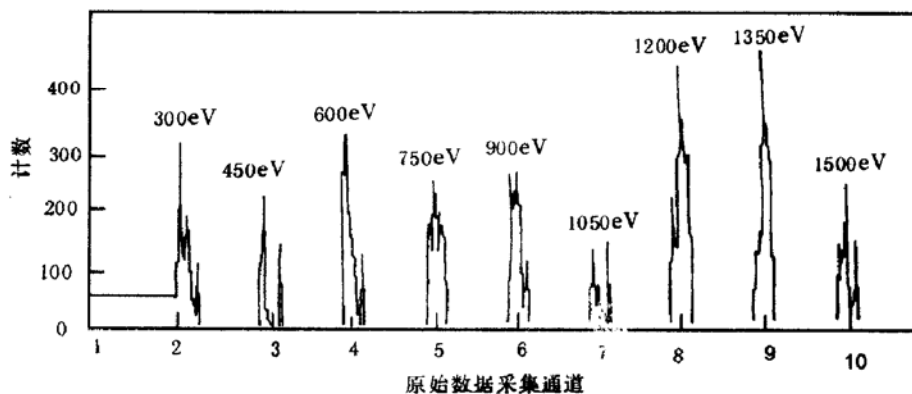


图 2. 十道谱仪各种能量的原始信号

采集得到的原始数据,经数据处理软件自动减去与能量无关的本底,根据如下公式:^[3]

$$S(E_i) = n(E_i)[B(E_i) \sigma_{cx}(E_i) E_i]^{-1[3]},$$

式中 $n(E_i)$ 为探测器的有效计数; $\sigma_{cx}(E_i)$ 为电荷交换截面; $B(E_i)$ 为谱仪的标定因子. 完成对标定因子和电荷交换截面的修正后, 计算出离子的能量分布如图 3. 在以能量为函数的半对数曲线上完成最小二乘法拟合, 在能量 0.45–1.5 keV 的范围内由拟合直线的斜率得到离子温度. 有关数据处理的详细推导在别处发表^[4].

象上述 $S(E_i)$ 半对数能量曲线, 每 5 ms 可测到一个, 因此每次放电都可以得到随时时间变化的离子温度.

为了研究等离子体芯部的离子行为, 取分析离子的能量大于 $(2-3)T_i(0)$. 这样可以认为测量的离子来自所观察弦的中心部分, 能谱仪又对准等离子体中心弦, 因此测量的能谱及离子温度都反映等离子体中心的离子状况.

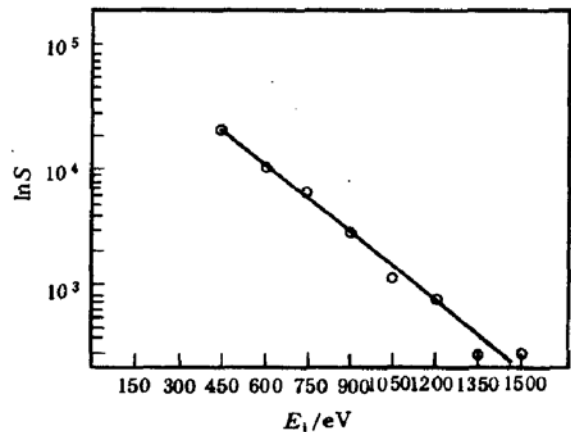


图 3 半对数的离子能量曲线

3 电荷交换测量结果

HT-6M 托卡马克中性注入的基本参数如下:

大半径 R : 65 cm	电子温度 T_e : 500 eV	电流 I_p : 80 kA
小半径 a : 20 cm	离子温度 T_i : 220 eV	注入功率 P_{NBI} : 50 kW
纵场 B_t : 0.9 T	电子密度 n_e : $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	

中性束注入是在放电 25 ms 时开始投入, 持续时间为 25 ms, 在注入期间, 由于束粒子的加热, 离子吸收了能量, 分布函数出现了明显变化. 图 4 是放电 $t = 20$ 和 35 ms 时测到的能谱. 在 $t = 20$ ms 时, 中性束尚未投入, 是欧姆放电, 实验点分布完全遵循麦克斯韦分布. 分布函数显示低能离子多, 高能离子少, 拟合直线的斜率大, 测定的离子温度低; 当 $t = 35$ ms 时, 注入中性束已持续 10 ms, 离子得到了加热, 但在测量的能量范围内未出现非麦克斯韦分布. 从图 4 中能谱可以明显看到, 加热以后, 高能离子增多, 能谱的高能部分被抬高, 拟合直线斜率减小, 反映离子温度升高.

由于每 5 ms 可以测到一个能谱, 因此研究了注入期间的离子温度变化与束的时间关系见图 5, 图 5 中显示, 束未投入以前, 离子温度是欧姆加热的 220 eV 左右, 束投入后, 离子温度迅速上升, 大约为 10 ms, 离子温度升高到 300 eV 左右, 此后束维持期间离子温度变化缓慢, 这是由于开始中性束产生的快离子把能量交给本底离子, 离子温度升高, 随着束的维持, 高能离子损失增加, 造成了离子温度上升不再明显. 从图 5 中可知中性注入期间, 离子温度由欧姆加热的 220 eV 左右上升到约 300 eV, 加热前后离子温度有很大幅度

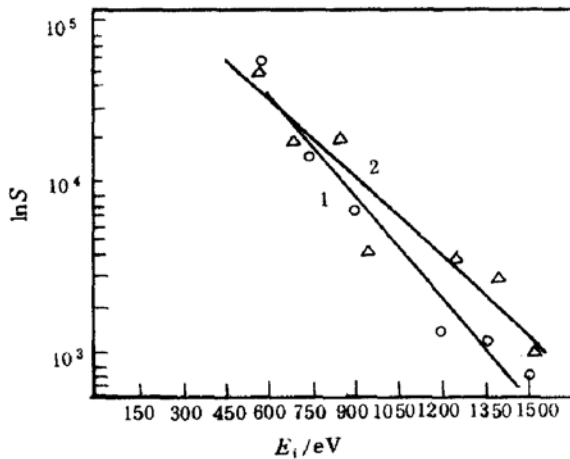


图 4 放电不同时刻的离子能谱

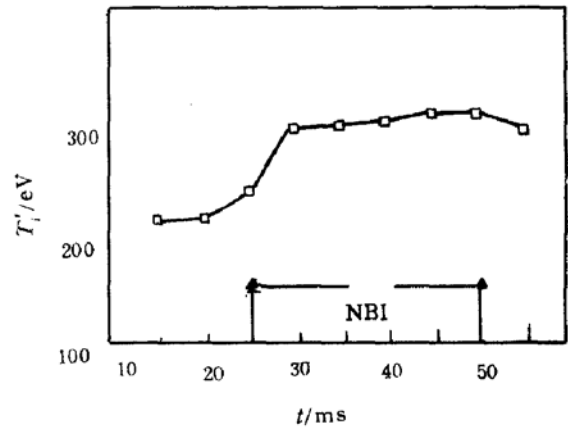


图 5 离子温度变化与注入束的时间关系

的增加,得到了中性注入的加热效果.

4 理论计算

根据 HT-6M 的实验条件,按照经典理论分析认为中性束注入等离子体后基本上都转换成为快离子,其快离子的约束状态较好而且电荷交换损失不十分严重.因此近似认为它们将全部能量都交给了等离子体.等离子体接受加热以后,其离子温度上升可以用经验公式 $\Delta T_i = 2P_{bi}/3P_{ei}$ ^[5] (P_{bi} 为注入功率, P_{ei} 为离子、电子之间的耦合功率) 计算得到. HT-6M 注入功率为 50 kW 时,得到离子温度上升为 82 eV.

根据上述假设,用含时二维非线性的 Fokker-Planck 方程对注入加热过程进行了计算^[6].

从基本方程出发

$$\frac{\partial f_a}{\partial t} + V_a \frac{\partial f_a}{\partial X} + \left(\frac{\bar{F}}{M} \right) \frac{\partial f_a}{\partial V} = \left(\frac{\partial f_a}{\partial t} \right)_{cc},$$

增加源项 S_a 和流项 J_a , 式中 f_a 为分布函数; F 为力场; $\left(\frac{\partial f_a}{\partial t} \right)_{cc}$ 为 Fokker-Planck 算子.

计算时假设等离子体各物理量位移空间均匀,速度空间关于磁场方向轴对称;略去环效应.

采用这些简化后 Fokker-Planck 方程变成一维时间二维速度的三维.

Fokker-Planck 算子采用 Rosenbluth 势. 在进行数值计算前把 Rosenbluth 势和分布函数按 Legendre 多项式展开,计算时取前四阶.

用 FPPAC 程序计算了 HT-6M 托卡马克中性注入过程中的离子能量分布和离子温度变化.

图 6 是中性注入后 15 ms 时的离子能谱理论计算与实验的比较. 图 6 显示,在注入后,高能离子增加,能谱的高能部分明显抬高,无论理论计算还是实验值都反映了这部分变

化,而且两者基本一致.

图 7 是中心离子温度随注入的时间变化理论值与实验值的比较.

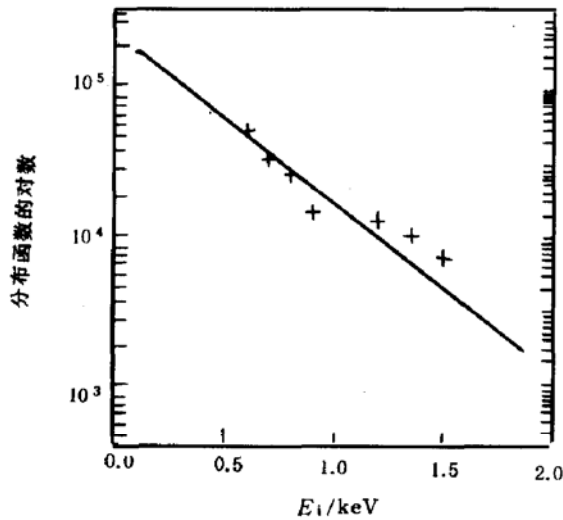


图 6 中性束注入后 15 ms 的离子能谱
实线为理论曲线;“+”为实验点

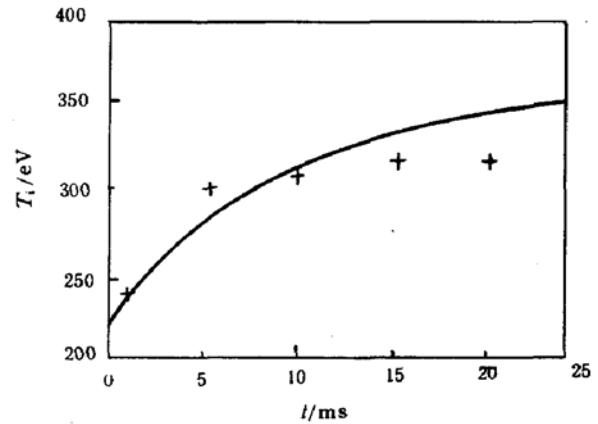


图 7 离子温度随注入束的变化
图注同图 6

图 7 中显示束投入开始 10 ms, 温度变化无论是趋势还是大小, 理论值与实验值都非常符合, 但在波持续的后 15 ms, 理论值明显比实验值偏高, 理论值反映的离子温度在缓慢增加, 而实验点基本维持在 300 eV 左右, 这主要是在束投入以后, 高能离子增加, 离子温度也随之增加, 但能谱仪分析的能量范围仍未提高, 这时测量的高能粒子, 已不是来自等离子体中心, 因此测定的离子温度比实际的中心离子温度要略低, 造成了上述差别.

理论计算还表明, 能量在 5 - 10 keV 之间的离子分布出现了高能平台, 这是快离子与本底离子能量交换的结果, 高能平台的出现对于今后增大聚变反应率是有利的. 但由于谱仪所测能区较低, 无法观测. 没有实验数据进行比较. 这也是今后实验中要进一步研究的内容.

5 结 论

1. HT-6M 托卡马克上中性注入加热实验使我们得到了这种辅助加热的实验效果. 经过电荷交换能谱分析, 测到了在注入期间离子温度的增加, 在注入功率为 50 kW 时, 离子温度提高了 80 - 100 eV, 实验测得的离子温度与理论估算以及根据 Fokker-Planck 方程计算的结果在误差范围内基本符合.

2. 用 Fokker-Planck 方程计算的离子能量分布变化, 在所测能量范围内, 理论值与实验点基本符合. 理论计算的高能平台在实验中未能观测, 还有待今后进一步研究, 未能测定的主要限制是能谱仪测量能量太低. 目前我们已有一台新的质能分辨、分析能量可达 50 keV 的中性粒子谱仪即将装上 HT-6M, 在以后的辅助加热研究中可望得到更加丰富的实验结果.

3. 随着加热功率的增加, 中性能谱分析除了观测离子温度变化以外, 其重点是在更大的能量范围内研究粒子的行为, 在实验与理论上更加深入研究那些麦克斯韦分布和偏

离分布的一些粒子现象,为离子的能量平衡和输运过程,能量约束和损失机制等问题作出有意义的工作.

实验是由 HT-6M 实验组和中性注入组一起完成.对工作中给予帮助的所有同事在此一并表示感谢.

- [1] L. A. Berry *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, **1**(1976), 49.
- [2] EQUIPE TFR, *Nuclear Fusion*, **18**(1978), 1271.
- [3] 项志遒等, 高温等离子体诊断技术(上海科学技术出版社, 上海, 1982), 第 139 页.
- [4] 刘胜侠等, 核聚变与等离子体物理, **13**(1993), 50.
- [5] 须平等, 核聚变与等离子体物理, **11**(1991), 175.
- [6] 王建国等, 硕士学位论文, 中国科学院等离子体研究所(合肥, 1993).

ANALYSIS OF CHARGE-EXCHANGE SPECTRA DURING NBI HEATING IN THE HT-6M TOKAMAK

LIU SHENG-XIA

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

(Received 11 November 1994)

ABSTRACT

Hydrogen ion energy spectra during NBI heating were investigated by energy analysis of charge-exchange neutral particle. The results indicate that ion temperature has been increased. The rise of ion temperature is in agreement with the values calculated by the method of the empirical scaling law.

The Fokker-Planck equation is used to calculate charge-exchange spectra and ion temperature, and compare them with the experiment results.

PACC: 5270; 5240M; 5250