

# HT-7 电子加热实验的软 X 射线能谱诊断

许平, 林士耀, 胡立群, 段艳敏, 石跃江, HT-7 物理实验组

(中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 介绍了 HT-7 装置上软 X 射线能谱诊断系统, 用软 X 射线能谱对 HT-7 托卡马克上电子温度进行了测量。在离子伯恩斯坦波和低杂波协同实验中, 观察到了对等离子体的较好的加热效果。

**关键词:** 软 X 射线能谱; 电子温度; 电子加热

**中图分类号:** TL65<sup>+</sup>1

**文献标识:** A

## 1 引言

目前, 在 HT-7 装置上对电子温度的测量有三种方法: 汤姆逊散射法、电子回旋辐射法(ECE)和软 X 射线能谱法(PHA)。在 HT-7 装置上汤姆逊散射测量的时空分辨率不高, 尤其在密度较低时, 散射信号较弱很难给出电子温度。电子回旋辐射法需要根据其它诊断标定, 否则只能用于相对测量, 在低杂波电流驱动时, ECE 包含了低杂波驱动的超热电子回旋辐射, 无法给出等离子体温度。相比以上两种方法, 软 X 射线能谱具有与 ECE 相近的空间分辨率, 可绝对测量各种放电情况下的电子温度<sup>[1]</sup>。HT-7 装置上软 X 射线能谱诊断使用的硅漂移(SDD)探测器在软 X 射线能段(1~20keV)具有较高的探测效率, 体积紧凑, 采用 Peltier 效应(一种热电效应)制冷, 能在较短的成形时间(0.5 $\mu$ s)下达到很高的能量分辨率(常温下, 对 <sup>55</sup>Fe 5.9keV 的 FWHM 为 153eV), 可以作为常规诊断方便地在托卡马克上实现对电子温度的空间多道测量。软 X 射线能谱不仅能提供不同条件下可靠的电子温度时空分布数据, 而且它还是测量有效  $Z_{\text{eff}}$  和研究重金属杂质的密度和聚芯状况的有效工具。低杂波非感应电流驱动实验以及低杂波与离子伯恩斯坦波协同实验是 HT-7 装置的主要特色。我们利用软 X 射线能谱诊断对离子伯恩斯坦波(IBW)和低杂波(LHW)协同加热情况下的电子加热进行了实验研究。

## 2 能谱诊断系统

HT-7 装置的大半径为 1.22m, 小半径为 0.27m, 纵场在 2T 左右, 典型的等离子体电流为 100~250kA, 等离子体密度为  $(0.5 \sim 4) \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ <sup>[2]</sup>。HT-7 装置上有两套射频波加热系统——低杂波以及离子伯恩斯坦波<sup>[2]</sup>。HT-7 装置上的低杂波系统天线采用的是多结波导阵天线, 其参数为: 频率 2.45GHz; 输出功率 1.2MW; 低杂波平行折射率  $n_{\parallel}^{\text{peak}}$  的范围为 1.8~3.4;  $\Delta n_{\parallel} = 0.4$ 。离子伯恩斯坦波可工作在三个不同的频率, 24MHz, 27MHz 和 30MHz。最大注入功率为 350kW。

在 HT-7 装置上, 软 X 射线能谱诊断系统包括水平和垂直方向两套诊断<sup>[3, 4]</sup>, 如图 1 所示, 其中水平窗口安装了空间 6 道 SDD 探测器, 覆盖了上半空间, 空间分辨率约为 4.8cm, 垂直窗口安装了空间 15 道 SDD 探测器阵列, 探测范围从高场侧到低场侧( $\pm 21$ cm)覆盖了全空间, 空间分辨率约为 3cm。通过调节可调准直孔和铍膜系统, 可以使 SDD 接收到的光子计数率处在一个合理的范围内(一般为 50~100kHz)。

## 3 IBW 和 LHW 协同实验电子加热分析

等离子体的电子温度和等离子体的电子加热状况密切相关。软 X 射线能谱诊断能方便快捷地给出实验中的电子温度数据, 基于该诊断系统可以对

收稿日期: 2007-08-18; 修订日期: 2008-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10675124); 教育部科学技术研究重点项目(208129)

作者简介: 许平(1980-), 男, 山东人, 中科院等离子体物理研究所读博士研究生, 等离子体物理专业。

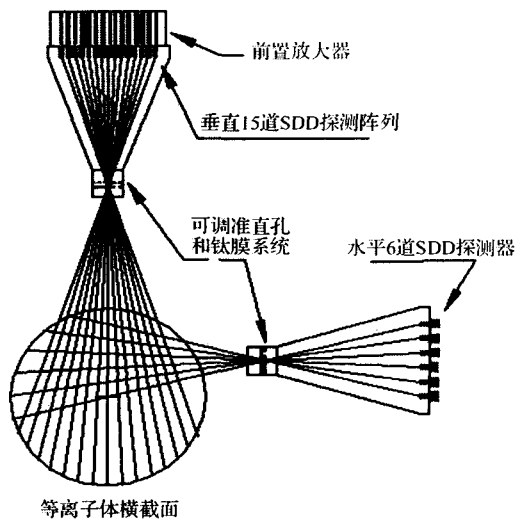


图 1 HT-7 软 X 射线能谱探测器的空间布局

各种放电条件下的电子加热实验进行研究。HT-7 装置上的低杂波(LHW)主要用于非感应电流驱动,实现长脉冲准稳态运行以及电流密度分布的控制。在 HT-7 装置上已经成功利用低杂波非感应电流驱动实现了中心电子温度约为 1keV 的 400s 的长脉冲加热等离子体放电。低杂波通过朗道阻尼将能量传递给共振电子来实现非感应电流驱动。由于快电子慢化以及快电子将部分能量传递给本底等离子体,因此低杂波在实现非感应电流驱动的同时将会加热等离子体。

控制等离子体电流密度剖面以及压强剖面是实现托卡马克先进运行模式的关键<sup>[2]</sup>。托卡马克等离子体的实验和理论研究表明,低杂波(LHW)与离子伯恩斯坦波(IBW)协同作用可以控制等离子体压强分布和电流密度分布,从而抑制磁流体不稳定性、改善等离子体约束和提高自举电流<sup>[5-8]</sup>。IBW 是一支静电波,在一定的参数条件下它可以通过电子朗道阻尼直接加热电子<sup>[5]</sup>。IBW 的平行折射率  $n_{\parallel}(x)$  沿径向振荡变化,在其  $n_{\parallel}$  最大处,IBW 将与等离子体发生强烈的电子朗道阻尼共振相互作用。因此可以利用 IBW 对等离子体的局部电子进行加热,从而控制等离子体的局部压强分布<sup>[9]</sup>。在 IBW 作用下,  $n_{\parallel}$  最大处的电子速度分布函数展宽(主要是第一个  $n_{\parallel}$  最大处),将增强 LHW 的功率沉积和驱动电流通道,从而改变整个驱动电流的分布<sup>[5]</sup>。因此利用

IBW 与 LHW 的协同作用可以局地地控制低杂波的能量沉积位置,即控制电流密度分布,从而实现先进运行模式。

HT-7 装置上利用 IBW 与 LHW 的协同作用实现了压强分布和电流密度分布的控制,从而获得了高约束等离子体<sup>[3,8,9]</sup>。当 IBW 频率为 27MHz,等离子体纵场为 1.8T,IBW 的共振层位于等离子体中心,对应的协同实验为中心加热模式。当 IBW 共振层处于等离子体中心,由于 IBW 的平行折射率  $n_{\parallel}(x)$  沿径向振荡变化,则低杂波功率在各个 IBW 的  $n_{\parallel}$  最大处都沉积能量,进而等离子体被整体加热。典型的波形如图 2 所示。该等离子体的电流为 160kA,等离子体密度为  $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ,纵场为 1.8T。在欧姆本底等离子体中投入低杂波功率  $P_{\text{LH}}=550\text{kW}$ ,时间为 250 ~ 2500ms。在投入低杂波期间向等离子体中注入了 240kW 的 IBW 功率,加热时间段为 800 ~ 2500ms。等离子体中心电子温度的时间演化如图 3 所示。从电子温度的时间演化可见,在 OH 阶段,等离子体的中心温度约为 0.9keV,当注入 550kW 的低杂波功率后,等离子体中心温度迅速增长到 1.8keV 左右。由于低杂波的非感应电流驱动,等离子体环电压从欧姆阶段的 1.3V 降低到 0.1V。随后等离子体中心温度由于 IBW 的加热增长到了 2.5keV。IBW 通过电子朗道阻尼改变了中心处的电子速率分布函数,使得该处的电子速率分布函数展宽,这为低杂波的吸收提供了快电子分布,填补了低杂波波谱与等离子体之间的谱隙,有利于低杂波功率的单次吸收<sup>[5]</sup>,因此在协同加热期间等离子体温度有较大幅度的增长。协同加热后期等离子体温度有所降低,这可能是由于高功率加热下等离子体中心杂质增加,增加了等离子体的辐射损失,从图 1 中的中心  $Z_{\text{eff}}$  信号也可以看出,投入 IBW 300ms 后,中心的  $Z_{\text{eff}}$  由投入 IBW 之前的 6 上升至 7.5,杂质辐射明显增加。从中心道的  $H_{\alpha}$  线辐射强度来看,投入 IBW 后粒子约束有一定的改善。

各个加热期间的电子温度分布见图 4 所示。在欧姆加热阶段,等离子体温度分布基本上服从类抛物线分布。在低杂波电流驱动阶段,等离子体内部区域( $a/2$ )的电子温度大幅增长,边界区域电子温度也有一定程度上的增长。在 IBW 与 LHW 协同加热阶段,等离子体中心温度进一步增长,而等离子体边界温度基本上无变化。这可能是由于协同效应的

作用, IBW 只在中心区域开辟了电流通路, 有利于低杂波功率中心沉积, 同时增强了低杂波功率的单次吸收, 因此加热效果好于纯低杂波加热。高参数先进运行模式需要高温等离子体, 而 IBW 与 LHW 协同实验实现了较高温度的等离子体, 这为先进运行模式提供了基础。

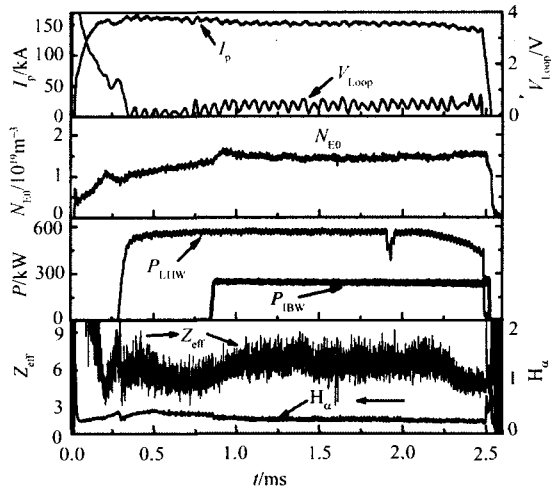


图2 两波协同的典型波形图

$I_p$  为等离子体电流,  $V_{loop}$  为环电压,  $N_{e0}$  为中心道弦平均电子密度,  $P_{LHW}$  和  $P_{IBW}$  分别为低杂波(LHW)和 IBW 的功率,  $Z_{eff}$  和  $H_\alpha$  分别为中心道有效电荷数和中心道  $H_\alpha$  线辐射强度。

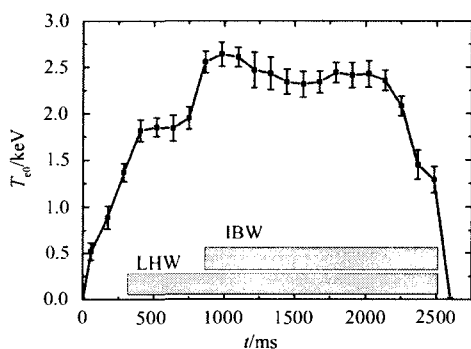


图3 等离子体中心电子温度  $T_{e0}$  随时间的演化

#### 4 讨论与总结

本文在介绍了 HT-7 装置上软 X 射线能谱诊断系统的基础上, 利用该诊断对低杂波(LHW)加热以及离子伯恩斯坦波(IBW)和低杂波协同加热情况下的电子加热进行了实验研究。从软 X 射线能谱诊断

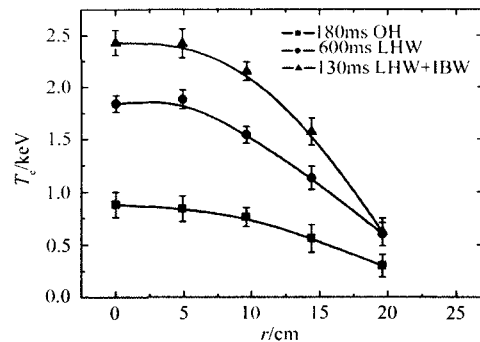


图4 不同加热模式下电子温度的剖面分布

的测量结果可知, 低杂波加热下, 等离子体温度在整个小截面上都出现了大幅度增长, 中心区域尤为明显, 等离子体中心温度从 0.9keV 增长到了 1.7keV。双波协同加热时, 等离子体中心电子温度进一步增长, 达到 2.5keV。由于在 IBW 的  $n_{IH}$  最大处, IBW 将与等离子体发生强烈的电子朗道阻尼共振相互作用, 为低杂波功率沉积提供了热电子分布。因此在 IBW 与 LHW 的协同作用下, IBW 在中心区域为 LHW 开辟了电流通路, 有利于低杂波功率沉积, 同时增强了低杂波功率的单次吸收, 加热效果好于纯低杂波加热。HT-7 装置上利用 IBW 与 LHW 的协同效应获得了较高温度的高温等离子体, 这为先进运行模式提供了基础。

#### 参考文献:

- [1] 宋先瑛. 硅漂移电子温度测量系统的研制 [R]. 成都: 核工业西南物理研究院年报, 2005.
- [2] Wan Baonian. Integration of LHCD and IBW heating for high-performance discharges under steady-state operation in the HT-7 tokamak [J]. Nucl. Fusion, 2003, 43: 1279.
- [3] Chen Z Y. A compact soft X-ray PHA in the HT-7 tokamak [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 527: 604-608.
- [4] Shi Yuejiang. Soft X-ray pulse height analyzer in the HT-7 tokamak [J]. Rev. Sci. Instrum., 2004, 75: 4930-4933.
- [5] Paoletti F. Experimental and theoretical investigation of local synergy between ion Bernstein and lower hybrid waves in the Princeton Beta Experiment-Modified [J]. Phys. Plasma, 1999, 6: 863.
- [6] Cardinali A. Quasilinear analysis of absorption of ion Bernstein waves by electrons [J]. Phys. Plasmas, 1995, 2: 1510.
- [7] Cardinali A. Analysis of the heating scenarios of the ion Bernstein wave (IBW) experiment in Frascati Tokamak Upgrade [J]. Nucl. Fusion, 2002, 42: 427.
- [8] Wan Baonian. Recent progress on steady-state high-

- performance plasma research in the Hefei Tokamak-7 [J].  
Phys. Plasmas, 2004, 11: 2543.
- [9] Wan Baonian. Control of profiles and transport by ion

Bernstein waves in the Hefei Tokamak-7 [J]. Phys.  
Plasmas, 2003, 10: 3703.

## Diagnoses of electron heating on HT-7 tokamak by soft X-ray spectra

XU Ping, LIN Shi-yao, HU Li-qun, DUAN Yan-min, SHI Yue-jiang, HT-7 experimental team  
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** The diagnostic system of soft X-ray spectra is introduced, and the electron temperature on HT-7 tokamak has been measured by this system. Remarkable increase of the electron temperatures has been observed in the experiments of plasma heating by ion Bernstein waves in collaboration with lower hybrid waves.

**Key words:** Soft X-ray spectra; Electron temperature; Electron heating