

低杂波驱动电流改善等离子体 约束的光谱测量

黄 荣 邓传宝 谢纪康 钟方川

汪舒娅 张守银 赵君煜

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

1993年4月16日收到

在 HT-6B 托卡马克低杂波驱动电流 (LHCD) 的同时, 等离子体的粒子及能量约束也随之发生改善. 我们从空间多道 $H\alpha$ 线的测量推算出 LHCD 可将等离子体粒子约束时间提高 1—5 倍. 介绍了我们的分析过程. HT-6B 上的 $H\alpha$ 线测量还表明粒子约束的改善程度与低杂波 (LHW) 的注入功率无明显依赖关系; 改善粒子约束的发生与超热电子的产生相对应. 通过观察边界层 OII 两条不同激发电位的谱线强度比的变化, 发现等离子体在约束改善的同时, 具有边界电子温度梯度增大的类 H 模现象.

PACC: 5255; 5225P; 5235

一、引 言

改善托卡马克等离子体约束不仅有利于提高等离子体参数, 还可通过这类实验来研究等离子体中复杂的反常输运过程. 继 ASDEX 上用中性束注入 (NBI) 获得 H 模之后, 离子回旋共振加热 (ICRH), 电子回旋共振加热 (ECRH) 下的 H 模, 超放电等改善约束状态都相继出现, 并且在近几年还出现了一些 LHCD 改善等离子体约束的实验结果^[1-3]. 虽然至今关于 L-H 模转换机制的研究已取得了不少明显的进展, 但关于 LHCD 改善约束的机制研究目前还没有较明确的结论, 理论和实验方面的工作都有待深入.

在 HT-6B 这一小装置上, 在限制器运行状态下, 利用 LHCD, 我们已经获得了改善等离子体粒子和能量约束的等离子体^[4]. 本文将介绍用 HT-6B 光谱测量系统在这一改善约束实验中所得出的研究结果, 其中包括: 多道 $H\alpha$ 线测量发现粒子约束时间可较欧姆运行状态提高 1—5 倍; 粒子约束时间的改善程度与注入的微波功率没有明显的依赖关系; 约束改善的发生与超热电子的产生有明显的对应关系; 通过测量 OII 的两条不同激发电位的可见谱线辐射强度比, 发现边界电子温度梯度因约束改善而增大. 这些结果对于我们认识 HT-6B 的 LHCD 改善的等离子体性质是很有意义的.

HT-6B 小装置的主要参数为: 大半径 $R = 45\text{ cm}$, 小半径 $a = 12.5\text{ cm}$, 纵场 $B_z \approx 7\text{ kG}$, $I_p = 20\text{--}40\text{ kA}$, $V_p = 1.0\text{--}2.0\text{ V}$, $T_e(0) = 150\text{--}250\text{ eV}$. 低杂波射频系统的输出频率为 2.45 GHz , 最大输出功率为 100 kW ^[5].

二、粒子约束时间的测量和 LHCD 对粒子约束时间的改善

1. HT-6B 托卡马克粒子约束时间的测量

在 HT-6B 托卡马克上,我们安排了多道可见光谱测量系统,可一次对等离子体小截面上半空间进行空间分布测量,监测可见光谱的时空变化过程。当我们用这套系统测量 $H\alpha$ 线辐射时,便可获得等离子体粒子约束时间 τ_p 。

托卡马克等离子体的粒子守恒方程为

$$dN/dt = S - N/\tau_p, \quad (1)$$

其中 N 为等离子体总粒子数; S 为粒子源项, 这里它主要来自源子的电离过程; τ_p 为粒子约束时间, 它的定义为

$$\tau_p = N/\Phi, \quad (2)$$

其中 Φ 为带电粒子向外输运的总通量。

在托卡马克中,若不计杂质的贡献, S 将来自于整个等离子体空间氢原子的电子碰撞电离过程:

$$S = \int s(r) dV = \int n_e(r) n_s(r) \alpha(T_e) dV \quad (3)$$

其中 $n_e(r)$, $n_s(r)$ 分别为电子密度和中性氢原子密度的空间分布; α 为氢的碰撞电离系数,它是电子温度的函数。

另一方面,空间氢原子的 $H\alpha$ 辐射强度为

$$\epsilon(r) = \frac{1}{4\pi} n_e(r) n_s(r) Q_{13}(T_e) \cdot A_{32}/(A_{31} + A_{33}) \quad (4)$$

其中 Q_{13} 为电子碰撞激发系数; $A_{nn'}$ 为自发辐射跃迁几率。则由 (3), (4) 式可知空间 $H\alpha$ 线辐射强度与 H 原子电离速率的比值只是等离子体电子温度的函数。并且,进一步的分析结果表明,当 $T_e > 10\text{eV}$ 时 (在 HT-6B 上这一条件基本满足), 这一比值又近似为一常数^[9], 因而我们可以很方便地利用 $H\alpha$ 强度的空间分布测量得出等离子体空间的电离速率,进而得出粒子约束时间 τ_p 。

在 HT-6B 上,我们利用多道可见光谱测量系统对等离子某一截面的上半空间的 $H\alpha$ 辐射进行多道绝对强度测量,然后在等离子体截面上下参数对称和大环方面参数对称的近似条件下便得出了该装置的粒子约束时间。其中 N 及 dN/dt 是根据 HT-6B 上的弦平均电子密度的测量及假定 $n_e(r)$ 为抛物分布的条件下得出的。根据 $H\alpha$ 线的测量分析结果,在 HT-6B 通常放电密度 $n_e = (0.8-1.0) \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 时, $\tau_p \approx 2.0\text{ms}$; 在 $n_e \approx 0.4 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 的低密度时, $\tau_p \approx 1.0\text{ms}$; $n_e = (1.5-2.0) \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 的较高密度时, $\tau_p \approx 3.0-3.5\text{ms}$ 。

2. LHCD 增强等离子体粒子约束

HT-6B 托卡马克 LHCD 改善等离子体约束的典型放电波型如图 1 所示。通常在放电进行到 $t = 10\text{ms}$ 时,等离子体参数已进入平稳态。然后加波,由于驱动电流效应,等

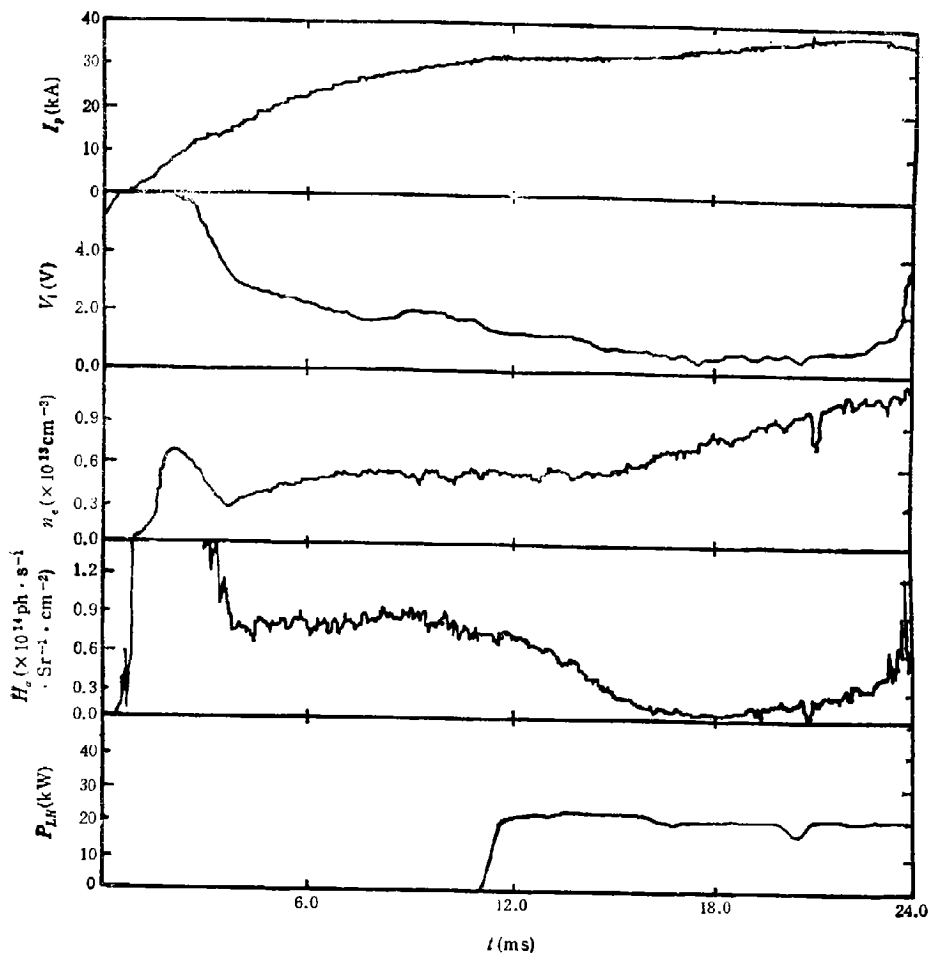


图1 LHCD 改善约束时,等离子体电流、环电压、密度及 $r = 11.0\text{cm}$ 处 $H\alpha$ 的变化. P_{LH} 为微波输入功率

离子体电流随之略有上升,等离子体环电压也因之下降。在图1所示的典型放电中,波功率 $P_{rf} = 20\text{kW}$, 加波后 I_p 由 32kA 升至 38kA , 环电压 V_1 由 2.0V 降至 1.0V 左右。此时,空间各道的 $H\alpha$ 线辐射在加波后都有非常明显的下降,如图2所示。其中穿过等离子体中心的 $H\alpha$ 线辐射可降至原来的一半以下,靠近边缘的 $H\alpha$ 线辐射可降至加波前的 $1/5$ — $1/10$ 。与此同时,从图1可看出,等离子体密度 n_e 却有明显的上升,这说明此时等离子体粒子约束时间明显增大。对于此次放电,数据处理得出粒子约束时间的变化为:加波前 $\tau_p = 2.0\text{ms}$, 加波后 τ_p 的最大值可达 12ms , 整个约束改善的过程持续了 10ms 左右(见图2)。此时等离子体内能也明显增加,能量约束也随之改善^[4]。

HT-6B 低混杂波系统的最大输出功率为 100kW , 而在上述实验中通常只使用在

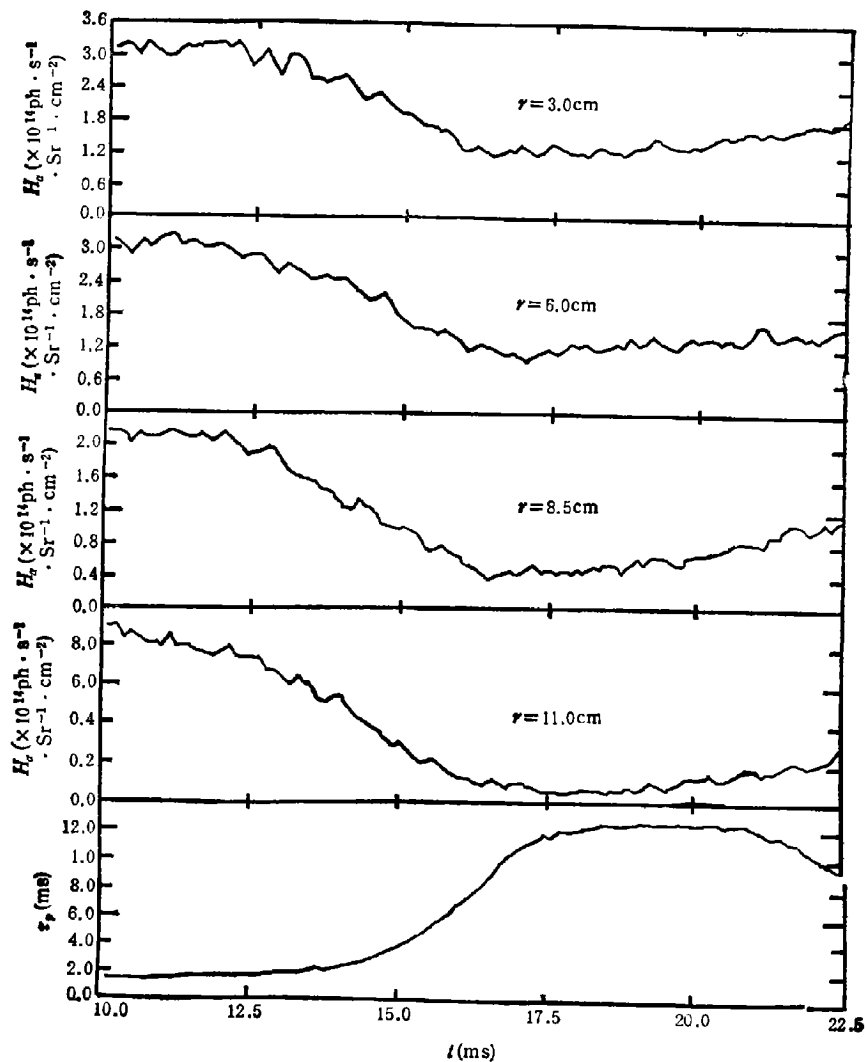


图2 等离子体不同弦位置的 $H\alpha$ 线强度的变化及计算出的 τ_p 随时间的变化。图2与图1为同一次放电

10 至 60 kW 之间，即微波功率不大于 HT-6B 上的欧姆加热功率（通常在 60 kW 左右）。当我们在重复的等离子体参数下，将微波注入功率从 10kW 到 60 kW 之间进行逐次扫描实验时，我们发现，电子密度的上升幅度， $H\alpha$ 线辐射的下降程度，即等离子体粒子约束时间的变化程度都大致相同，这说明，HT-6B 可达到的粒子约束改善的程度与微波注入功率的大小无关（图 3）。但同时也发现，微波注入功率的大小会影响到发生约束改善时 τ_p 的变化速率：较大的微波注入功率可使 τ_p 较快地达到某一最大值。实验中还发现，这种时间变化过程与等离子体中产生超热电子的时间过程有很好的对应关系

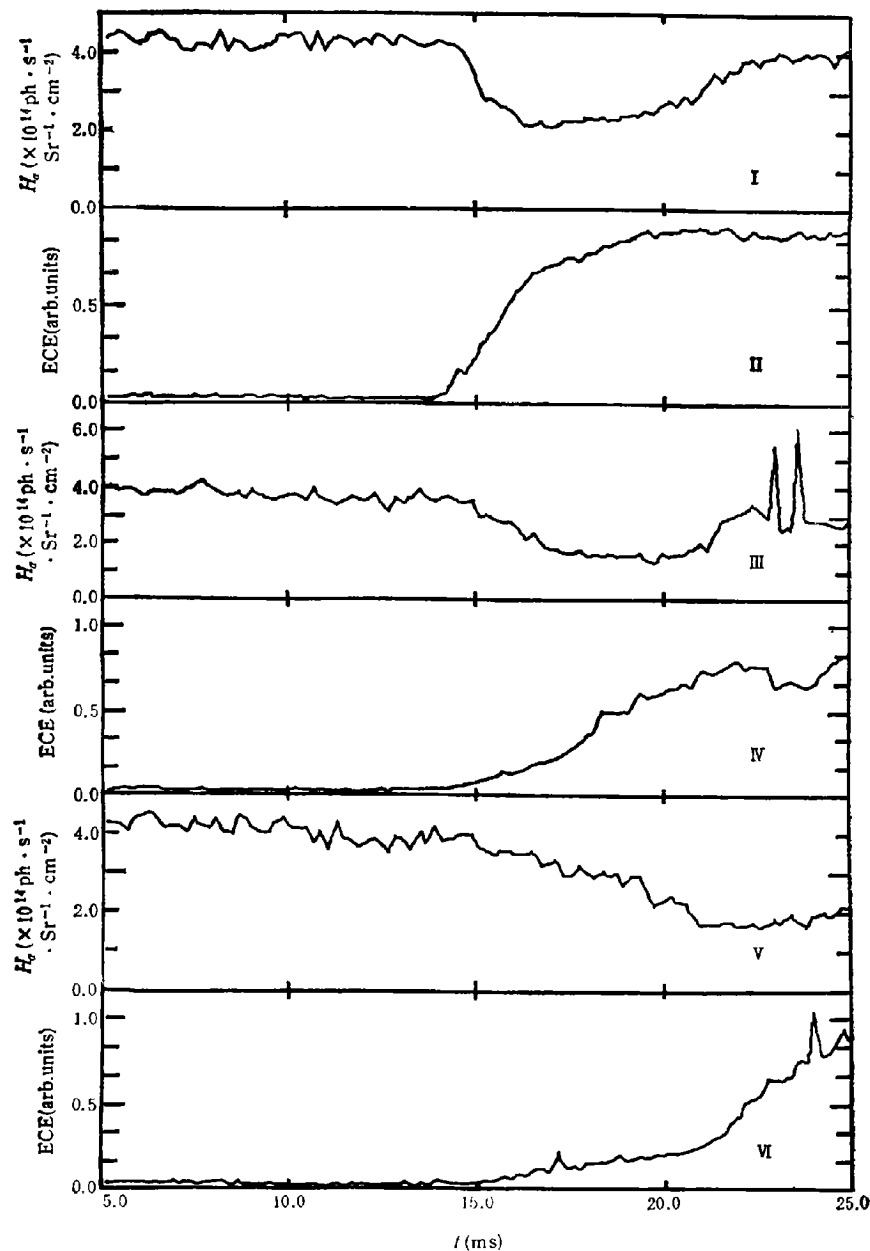


图3 不同微波注入功率下, $H\alpha$ 线具有大致相同的下降幅度; $H\alpha$ 的下降速率与超热电子辐射 (ECE 信号) 相对应。I, II 为 $P_{LH} = 60\text{kW}$; III, IV 为 $P_{LH} = 25\text{kW}$; V, VI 为 $P_{LH} = 10\text{kW}$

(图3)。在 LHCD 等离子体中, 由于超热电子可产生很强的电子回旋辐射, 因而在 HT-6B 上, ECE 信号的异常增大就意味着 LHCD 产生了许多超热电子。图3的结果

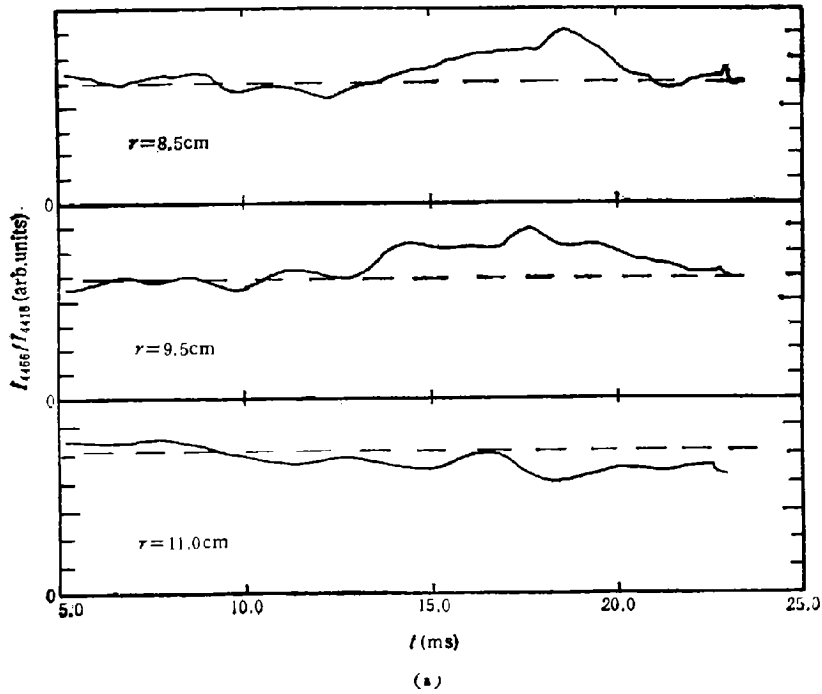
表明,约束改善发生的时间过程总是与超热电子产生的时间过程相对应。

此外,上述结果还表明,用 LHCD 实现改善约束并不需要很大的辅助加热功率,例如在 HT-6B 上只用了相当于欧姆加热功率几分之一之射频功率即可改善等离子体约束。这也说明, LHCD 这种改善等离子体约束状态与标准的H模改善约束状态的实现过程具有很大的区别。

三、边界电子温度的变化

弄清 LHCD 改善等离子体约束时等离子体性质的变化是最终认识这种约束改善机制的基础,为此,在 HT-6B 上,我们用上述多道可见光谱系统,通过监测 OII 的两条不同激发电位的线辐射的强度比,推算出边界等离子体不同径向位置上的电子温度的变化趋势。

我们所选择的 OII 的两条可见谱线的波长分别为 441.8nm 和 446.6nm,它们相对基态的激发电位分别为 26.24eV 和 33.20eV,两个激发电位之差为 6.96eV。这两条谱线的跃迁过程分别为 $2p^23s-2p^2(^3P)3p,^2P-^2D^0$ 和 $2s2p^33s'''-2s2p^3(^3S^0)3p''',^4S^0-^6P$ 。由于这两条谱线的激发电位差别明显,并且,随着电子温度的升高,由于较高激发电位的能级更易于被激发,它对应的线辐射强度与较低激发电位的谱线强度之比就会变大;反之,若电子温度下降,则它们的比值就会减少。实验中我们主要观察了穿过 $r=8.5,9.5$ 和 11.0cm 的不同弦位置上的这两条谱线的强度比。在 HT-6B 等离子体中, OII 辐射的



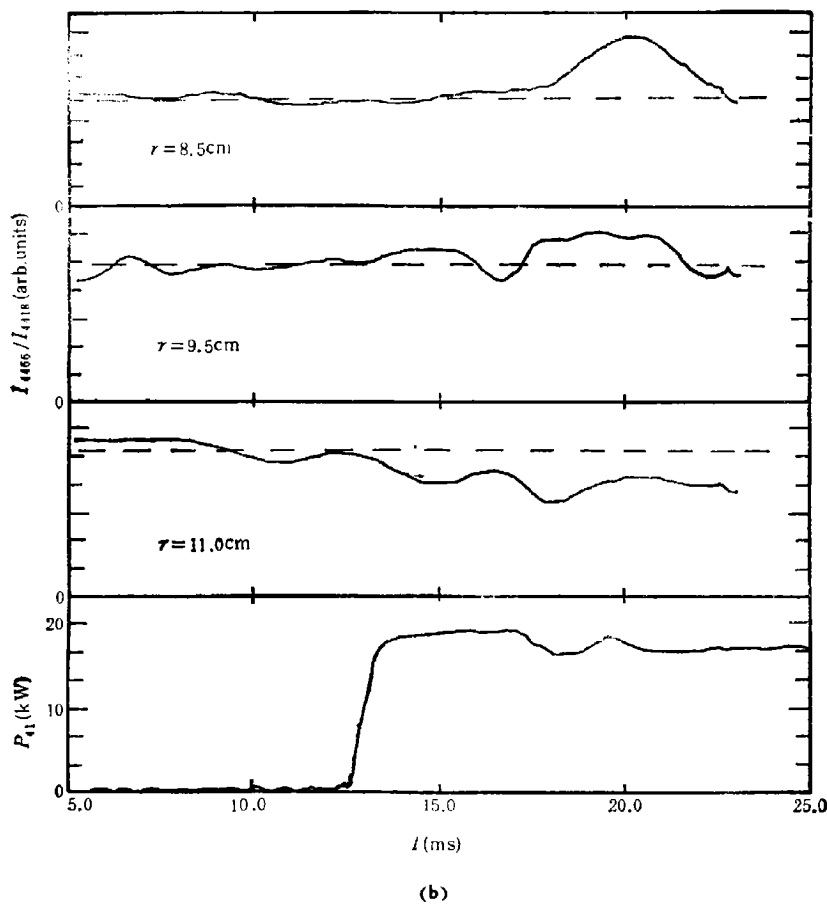


图4 两组 I_{4466}/I_{4418} 值在改善约束时的变化。(a) 的加波时刻与 (b) 相同；破折线为加波前一段时间 I_{4466}/I_{4418} 的平均值

空间壳层分布的峰值位于 $r = 8.5—9.0\text{cm}$ 附近^[7],因而 $r = 8.5\text{cm}$ 和 $r = 9.5\text{cm}$ 两条弦的测量结果主要反映了这一壳层峰位置附近的温度变化,而 $r = 11.0\text{cm}$ 弦的辐射变化则主要反映了 $r = 11.0\text{cm}$ 处的温度变化。

从图4所列出的两组测量结果可以看出, OII 这两条谱线的强度比 I_{4466}/I_{4418} , 在 LHCD 改善等离子体约束时具有一定的变化规律。在 $r = 11.0\text{cm}$ 处, 约束改善时, I_{4466}/I_{4418} 值略有下降, 这说明此时 $r = 11.0\text{cm}$ 处的电子温度具有下降趋势; 另一方面, 穿过 $r = 8.5, 9.5\text{cm}$ 两条弦上的 I_{4466}/I_{4418} 值具有明显的上升趋势, 这说明在 $r = 9.0\text{cm}$ 附近, T_e 因约束改善而明显上升。这也说明此时边界等离子体的电子温度梯度已明显增大。HT-6B 托卡马克边界探针的测量结果也表明, LHCD 改善约束时限制器附近的 T_e 确有明显下降^[4], 这进一步说明了约束改善时边界等离子体的电子温度梯度增大。

四、总结与讨论

本文主要介绍了利用多道可见光谱测量系统测量分析 HT-6B 托卡马克 LHCD 改善约束实验所得出的几点结论: 1) LHCD 可明显改善等离子体粒子约束(此时等离子体的能量约束也有成倍的改善^[4]); 2) LHCD 对粒子约束的改善程度与输入的微波功率的大小无明显对应关系,但较大的微波输入功率可使等离子体粒子约束时间 τ_p 具有较快的增长速度; 3) LHCD 改善粒子约束与超热电子的产生具有很好的对应关系; 4) 光谱测量还表明,在 $r = 11.0\text{cm}$ 处,改善约束时 T_e 具有下降趋势,而在 $r = 9.0\text{cm}$ 附近, T_e 已具有明显的上升,结合 HT-6B 上边界探针的测量结果,说明此时边界等离子体电子温度梯度已有明显的增大。

目前关于 LHCD 改善等离子体约束的物理机制仍是不清楚的,这一问题的解决还有待于更多的改善约束的实验研究。HT-6B 上的实验结果显示了在该装置上利用 LHW 可以比较容易地实现改善约束状态; 尽管这种约束改善的产生过程与 H 模的产生过程具有明显的不同之处,但它们在边界电子温度的变化上却具有相似之处。这些结果也可作为我们今后在这一领域进行更深入研究的一个基础。

感谢本所 HT-6B 运行组, LHW 运行组人员的大力支持和合作。

- [1] S. Tsuji, K. Ushigusa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 1023.
- [2] M. Nakamura, T. Minami *et al.*, *Nucl. Fusion*, **31**(1991), 1485.
- [3] Y. Takase, P.T. Bonoli *et al.*, *Nucl. Fusion*, **27**(1987), 53.
- [4] Deng Chuanbao, Huang Rong *et al.*, IAEA-CN-56/E-3-1, (1992).
- [5] Xie Jikang *et al.*, *Proceeding of TCM on Research Using Small Tokamaks*, (Hefei, 1991), A-6.
- [6] K. J. Behringer, *J. Nucl. Mater.*, **145-147**(1987), 145.
- [7] Huang Rong, Xie Ji-kang *et al.*, *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, **2**(1993), 22.

SPECTROSCOPIC DIAGNOSTIC RESULTS OF THE IMPROVED PLASMA CONFINEMENT BY LOW HYBRID CURRENT DRIVE

HUANG RONG DENG CHUAN-BAO XIE JI-KANG ZHONG FANG-CHUAN
WANG SHU-YA ZHANG SHOU-YIN ZHAO JUN-YU

Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031

(Received 16 April 1993)

The plasma energy and particle confinement could be improved by LHCD in HT-6B tokamak. A multichannel $H\alpha$ monitoring system was used for the measurement of particle confinement in the experiment. The particle confinement time has been increased two to six times by LHCD. There is no apparent relation between the τ_p increment degree and the input LHW power (10—60 kW). But there is a good correlation between the appearance of improvement and the appearance of the energetic electrons caused by LHCD. With the measurement of emissivity ratio of OII 441.8 nm and OII 446.6 nm within the plasma edge ($r = 8.5$ —11.0 cm for $a = 12$ cm). We discovered that, when improvement happened, the gradient of electron temperature in plasma edge increased, the same tendency of the change as in the case of H-mode.

PACC: 5255; 5225P; 5235