

HT-7 Tokamak 离子回旋波和低杂波 等离子体逃逸电子行为研究*

卢洪伟[†] 胡立群 周瑞杰 许 平 钟国强 林士耀 王少锋

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥 230031)

(2009 年 10 月 10 日收到;2009 年 12 月 14 日收到修改稿)

HT-7 Tokamak 拥有离子回旋波(ICRF)和低杂波(LHW)两套加热系统. ICRF 主要对加热离子有比较好的加热效果, LHW 则主要是通过电子 Landau 阻尼加热电子. 除此之外, 在 ICRF 和 LHW 协同加热的条件下, 可以对等离子体产生更有效的加热效果, 增加等离子体的聚变反应截面, 增加聚变中子产额. 本文报道了 LHW 对改善 ICRF 和等离子体耦合的重要作用, ICRF 和 LHW 加热等离子体中电子温度随时间的演化过程; 计算了放电过程中电子逃逸的阈值能量, 分析了逃逸电子的产生过程, 以及放电过程中的中子产额. 研究结果发现: 一定功率的 LHW 有助于改善 ICRF 和等离子体之间的耦合. ICRF 和等离子体耦合情况的不同将对逃逸电子的产生率造成影响. ICRF 的投入有利于增加等离子体聚变的反应截面, 增加 Tokamak 等离子体的聚变中子产额.

关键词: Tokamak, 低杂波, 离子回旋波, 逃逸电子

PACC: 5225, 5250, 5255

1. 引 言

离子回旋波(ICRF)加热由于低廉的价格, 技术上难度也不大, 在 Tokamak 等离子体加热中得到了广泛的应用. 许多装置都把它作为主要的加热手段之一. 在国际热核聚变实验堆 ITER 上, ICRF 加热和驱动的功率为 20 MW^[1]. ICRF 共振加热或驱动采用的是基频或倍频模式, 其中都包括波的激发、传播、吸收和模转换过程; 离子回旋共振衰减是主要的吸收机理. 在 Tokamak 中的等离子体中, 主要是环向磁场强度决定共振区域. 在实际应用中可以将共振区选在磁轴附近的中心约束区, 称之为近轴加热, 也可以选在靠近外部边界的区域, 称为偏轴加热. 通过共振区域的调节可以实现等离子体电流的坡面控制. ICRF 属于快波, 波长在米的量级, 主要沿密度梯度的方向传播. ICRF 在等离子体内部产生的电场几乎垂直于磁场, 主要通过回旋加速效应加热等离子体, 因此 ICRF 加热使得离子的垂直能量增加.

低杂波(LHW)电流驱动是射频波驱动的一种, 也是目前为止驱动效率最高的非感应电流驱动方法之一^[2]. 同样, LHW 电流驱动也可以调节电流密度坡面分布, 优化等离子体约束状态, 是实现 Tokamak 长脉冲稳态运行不可或缺的手段. LHW 属于慢波, 波长非常短, 是厘米的量级. LHW 在等离子体中产生的电场主要沿着磁场的方向. LHW 的驱动机理是利用天线向等离子体中注入功率谱不对称的 LHW 频段的微波, 使 LHW 主要朝向大环的一个方向发射, LHW 通过电子 Landau 阻尼将能量传给共振电子, 因此这些共振电子主要在大环的一个方向上被加速^[3]. LHW 不仅可以驱动等离子体电流, 而且可以控制等离子体电流的密度坡面, 从而实现 Tokamak 的先进运行模式^[4-7]. 在 Tokamak 热等离子体中, 逃逸电子的存在是不可避免的, 而大量高能的逃逸电子在等离子体破裂时会局域损失到装置的第一壁材料上, 产生很高的热负荷, 使真空室的甲板材料熔化或产生溅射, 从而影响装置的运行寿命^[8]. 在国内两个 Tokamak 装置 HT-7 和 HL-2A 上都对逃逸电子进行了相关的研究^[9-12].

* 国家自然科学基金(批准号:10935004, 10775041)资助的课题.

[†] E-mail: luhw@ipp.ac.cn

在 HT-7 Tokamak 上不同离子回旋共振频率下 (24.40 和 56 MHz), 实现了最大功率为 600 kW 的离子回旋共振加热. 对于在 LHW 频率 2.45 GHz 下, 实现了最高功率达 800 kW 的 LHW 电流驱动. 本文主要研究了 ICRF 和 LHW 协同加热情况下的等离子体逃逸电子行为.

在 HT-7 Tokamak 上利用现有的加热手段, 进行了 LHW 和 ICRF 的相关实验研究. 通过对 γ 射线 (GM)、中子辐射、快电子韧致辐射 (FEB)、电子回旋辐射 (ECE)、 $H\alpha$ 线辐射、可见韧致辐射、软 X 射线能谱以及碳杂质线辐射等辐射信号的监测, 研究了 LHW 和 ICRF 下等离子体的基本特性, 以及不同功率的 ICRF 对 LHW 等离子体中逃逸电子行为的影响.

2. 低功率 ICRF (200 kW) 对 300 kW LHW 等离子体逃逸电子的影响

如图 1 所示, #104770 放电过程中加入了 300 kW 的 LHW. 等离子体电流 $I_p = 120$ kA, 等离子体密度 $n_e = 1.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 放电过程中等离子体电流和等离子体密度都由程序反馈控制. #104771 放电过程中除了加入 300 kW 的 LHW, 还在 500 ms 时加入了频率为 56 MHz, 功率为 200 kW 的 ICRF. 图 1 中 I_p 为等离子体电流, V_{loop} 为等离子体环电压, GP 为充气阀门的电压信号, n_e 为等离子体中心线平均密度, P_{LHW} 为 LHW 功率, P_{ICRF} 为 ICRF 功率波形.

从图 1 可以看出, ICRF 的加入使放电等离子体密度在充气阀门关闭 (如图 1 GP-104771) 的情况下, 由 $n_e = 1.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 增加到了 $n_e = 2.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 增长的幅度接近一倍, 说明 ICRF 在等离子体芯部引进了大量的杂质, 如图 2 所示碳杂质和可见韧致辐射信号增强. 杂质使等离子体密度显著提高. 从而电子碰撞频率随之增加, 因此电子慢化时间减少. 由于 ICRF 引入到等离子体的杂质辐射功率增加, 相当一部分等离子体内能以杂质辐射的形式散发出去, 因此等离子体中的超热电子减少. 表现为图 2 中 ECE 辐射下降, 快电子 FEB 减小. 由于等离子体电流是程序反馈控制的, 在等离子体密度增加的情况下, 维持相同的等离子体电流需要更大的 Ohm 加热场, 因此等离子体环电压在等离子体密度增加以后有一定程度的增加, 从 0.6 V 增加至 0.9 V, 增长幅度为 50%.

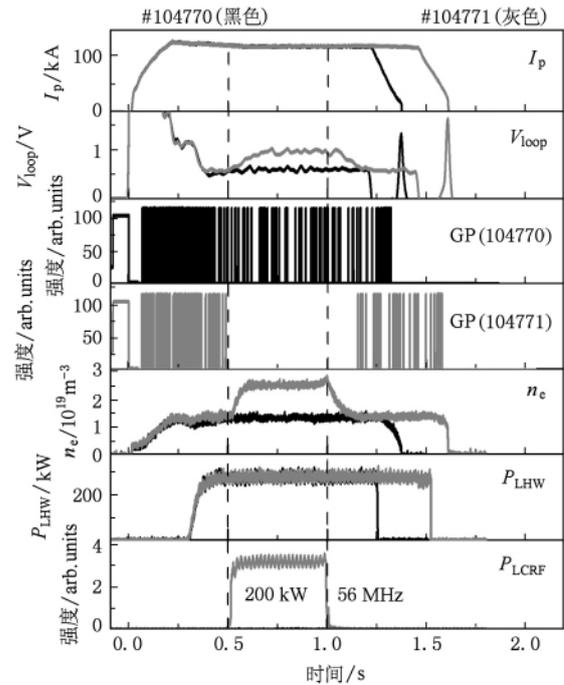


图 1 #104770 和 #104771 放电波形图

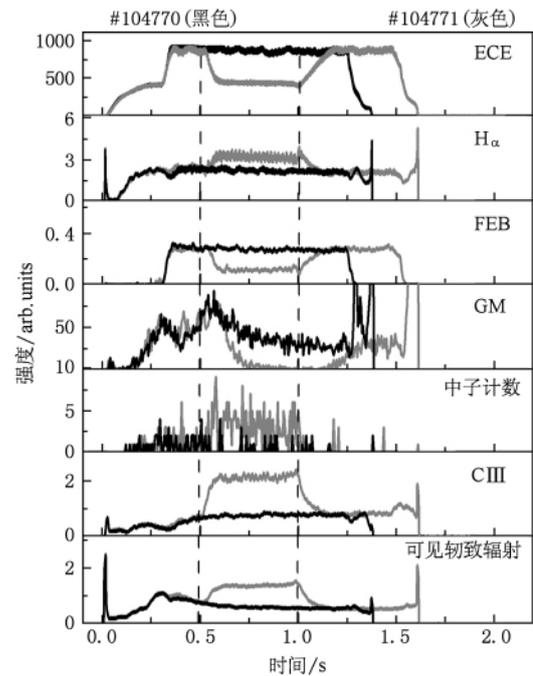


图 2 #104770 和 #104771 放电等离子体辐射参数图. ECE 为电子回旋辐射强度, $H\alpha$ 为 $H\alpha$ 线辐射强度, FEB 为快电子韧致辐射强度, GM 为 γ -射线辐射强度, CIII 为碳杂质辐射强度.

#104771 软 X 射线能谱测量得出的电子温度如图 3 所示. 在 300 kW LHW 加入以前, 等离子体的电子温度为 0.6 keV, 随着 LHW 的加入, 电子温度上

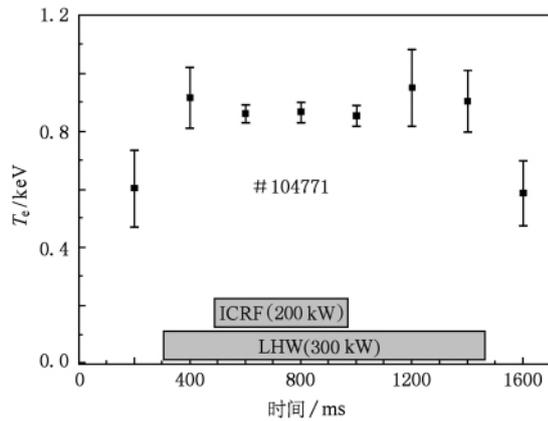


图3 #104771 软 X 射线能谱测量得出的电子温度

升至 0.95 keV 左右. 在 ICRF 加入的过程中, 由于等离子体杂质辐射功率的增强, 相当一部分等离子体内能以杂质辐射的形式散发出去, 因此等离子体电子温度有减小的趋势, 降低到 0.85 keV. 随着 ICRF 的关断, 杂质辐射功率减小, 等离子体电子温度开始增加, 上升到 0.95 keV 左右. 随着 LHW 的关断, 等离子体电子温度下降到 0.6 keV.

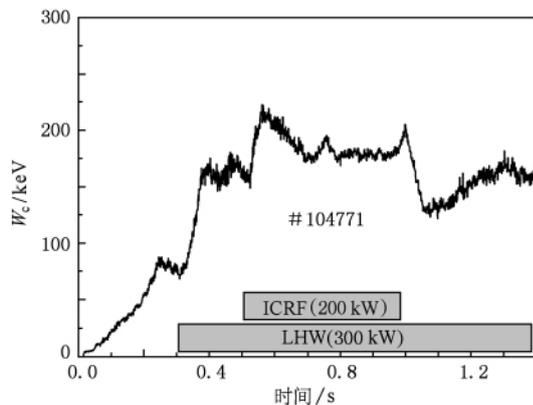


图4 #104771 逃逸电子的逃逸阈值

图4显示了根据实验数据估算的#104771 放电过程中逃逸的阈值能量 ($W_c = \frac{e^3 n_e \ln \Lambda (2 + Z_{\text{eff}})}{8\pi \epsilon_0^2 E}$, 其中 $\ln \Lambda$ 为 Coulomb 对数, Z_{eff} 为等离子体有效电荷, ϵ_0 为真空介电常数, E 为电场强度) 随时间的变化曲线. 从图中可以看出, 在 LHW 投入以前由于等离子体环电压比较高, 逃逸阈值比较低, 因此估算得出的逃逸的阈值能量只有 85 keV 左右, 逃逸比较严重. 在 300 ms 左右 LHW 投入, LHW 通过电子 Landau 阻尼加热电子, 将电子加速到较高的能量, 使得电子温度在此期间显著升高 (如图3所示). 由

于等离子体电阻率 ($\eta_s = 0.51 \frac{m_e^{1/2} e^2 \ln \Lambda}{3 \epsilon_0^2 (2\pi T_e)^{3/2}} \sim T_e^{-3/2}$, m_e 是电子静止质量, T_e 为电子温度) 与电子温度的 3/2 次方成反比, 电子温度越高电阻率越小, 维持一定的等离子体电流所需要的环电压越小. 电子的逃逸阈值和环电压成反比, 因此, LHW 投入以后电子的逃逸阈值增加到 170 keV 左右. 在 500 ms 左右, 由于 ICRF 的投入, 引起了等离子体密度的迅速增长, 虽然这一阶段环电压有所升高, 但是等离子体密度的增长幅度远大于环电压的增长幅度, 因此计算得出的电子的逃逸阈值升高到 200 keV 左右. 逃逸阈值的升高使得逃逸电子减少, 从图2的 GM 辐射信号也可以看出, ICRF 投入以后 GM 信号开始减弱, 同样验证了 ICRF 投入以后逃逸电子的减少.

ICRF 的加入, 使电子的逃逸阈值由于等离子体密度和有效电荷数的增加有一个明显的增加趋势. 随着 ICRF 的关断, 电子的逃逸阈值由 200 keV 减小到 125 keV. 从图2中#104771 的 GM 信号可以看出, GM 信号在 ICRF 加入以后开始减弱, 在 ICRF 关断以后开始增长. 这说明在 ICRF 加入期间逃逸电子厚靶韧致辐射减弱. 但是在此期间中子辐射信号基本维持不变, 说明绝大多数中子是由于在等离子体内部的核聚变反应产生的. 由于 ICRF 的加入, 等离子体中的离子温度显著增加, 聚变反应截面增加, 因此在等离子体内部发生了聚变反应, 产生了聚变中子. 所以在 ICRF 加入以前和关断以后中子辐射信号都比较弱, 而在 ICRF 加入期间中子信号比较强.

3. 低功率 ICRF (200 kW) 对 200 kW LHW 等离子体逃逸电子的影响

如图5所示, #105977 和#105980 放电等离子体电流为 140 kA, 反馈控制的等离子体密度为 $n_e = 2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 150 ms 时加入 200 kW LHW. 由于 LHW 的加入, 放电等离子体的环电压由 2.6 V 降低到 0.5 V 左右. 对于放电#105980, 在 360 ms 加入频率为 24 MHz、功率为 200 kW 的 ICRF.

#105977 和#105980 放电的等离子体辐射参数如图6所示. 比较#105977 和#105980 放电可以看出, #105980 放电等离子体密度、环电压、杂质辐射以及整体的等离子体辐射特性并没有很明显受到

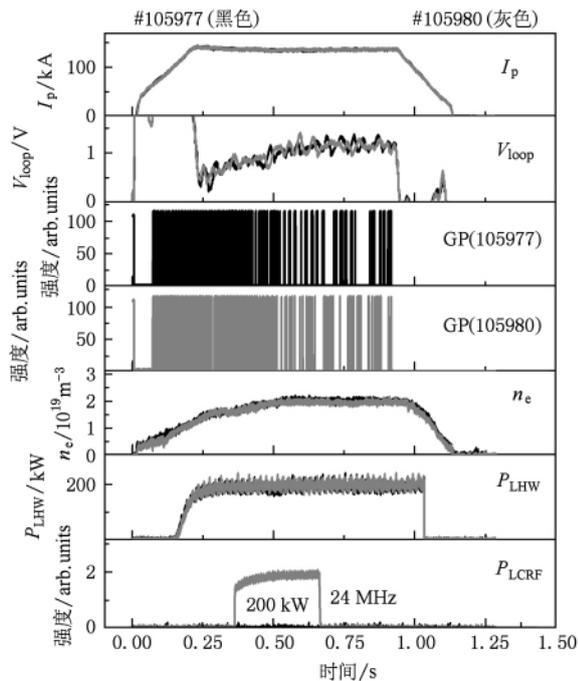


图5 #105977和#105980放电波形图

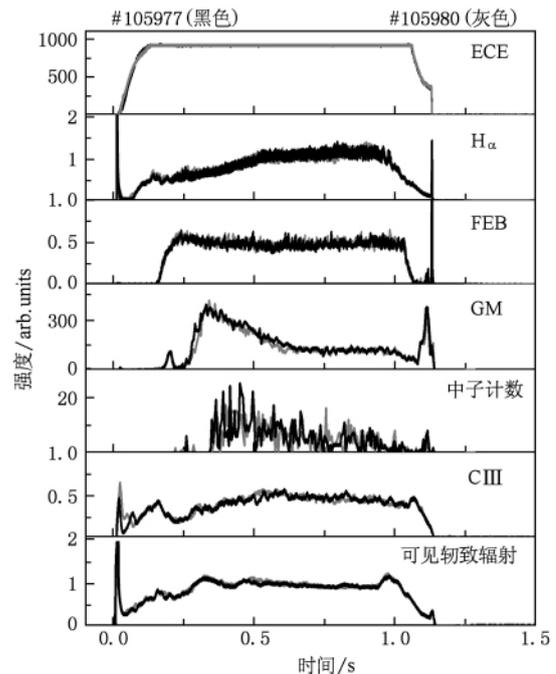


图6 #105977和#105980放电等离子体辐射参数图

ICRF的影响. 这可能是因为#105980放电过程中加入的LHW的功率为200 kW,而图1中#104771加入的LHW的功率为300 kW. 在#104771放电过程中,更高的LHW功率使得ICRF和等离子体之间产生了更好的耦合. 而对于#105980放电,由于LHW的功率没有达到一定的功率阈值,因此ICRF没有更好地耦合到等离子体中,加热效果不明显,只是在中子辐射信号中稍微有增加. 由此推断,在200 kW低杂波电流驱动(LHCD)等离子体中,ICRF(200 kW, 24 MHz)的加入使等离子体的聚变反应截面有少量的增加. 由于ICRF没有对等离子体密度、环电压和杂质辐射等宏观放电参数造成影响,因此,反应放电过程中逃逸电子信息的GM信号没有因ICRF的加入产生明显的变化.

4. 高功率ICRF(400 kW)对400 kW LHW等离子体逃逸电子的影响

以上两个部分研究了在低功率ICRF(200 kW)和LHW(200 kW和300 kW)情况下的等离子体和逃逸电子行为. 在HT-7 Tokamak上也进行了ICRF和LHW的高功率加热实验. 如图7所示, #105769放电等离子体电流为140 kA,反馈控制的等离子体密度为 $n_e = 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 在150 ms加入400 kW

的LHW,等离子体环电压由2.2 V降低到0.3 V左右. 频率为40 MHz,功率为400 kW的ICRF在460 ms加入. 随着ICRF的加入,等离子体密度由反馈控制时的 $n_e = 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 增长到 $n_e = 2.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 左右. 而等离子体环电压则由ICRF加入前的0.3 V增加到1.5 V左右.

#105769软X射线能谱测量得出的电子温度如图8所示. 随着400 kW LHW的加入,等离子体中的电子通过电子Landau阻尼被加热,等离子体电子温度由0.7 keV增长到1.2 keV左右. 明显高于图3所示的#104771的电子温度,体现了高功率LHW的加热效果. 在460 ms,频率为40 MHz,功率为400 kW的ICRF加入使等离子体中的杂质辐射功率增加(如图9所示). 等离子体中的电子温度因此而降低到1.0 keV左右. 随着ICRF的关断,杂质辐射功率降低,电子温度又升高到1.1 keV.

从图7中GM信号可以看出,ICRF的加入引发了逃逸电子的产生. 计算得出的电子逃逸阈值能量随时间的变化如图10所示. 400 kW LHW的加入,使等离子体环电压由2.2 V降低到0.3 V左右,计算得出的电子逃逸阈值速度由30 keV增长到200 keV. 400 kW ICRF的加入使等离子体的杂质辐射增强(如图9所示),等离子体密度增加,由此导致等离子体环电压增加,而且环电压的增加幅度大于等

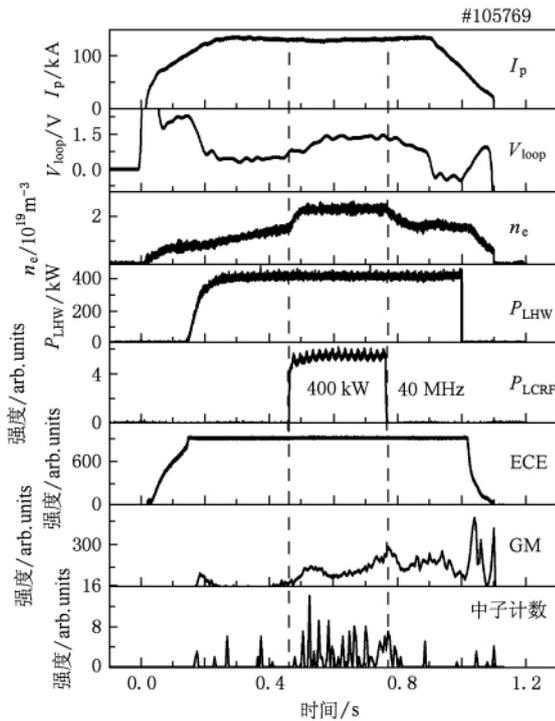


图 7 #105769 放电波形图

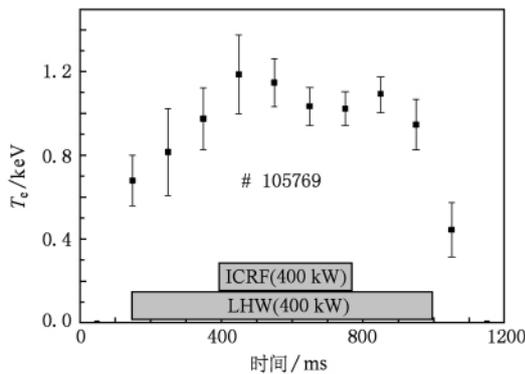


图 8 #105769 软 X 射线能谱测量得出的电子温度

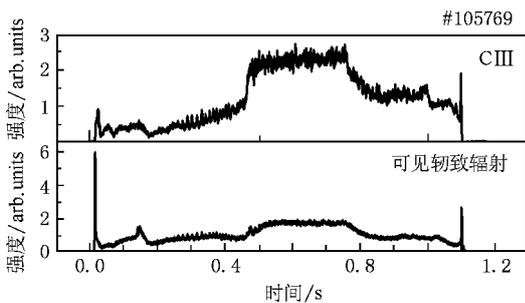


图 9 #105769 放电过程中辐射波形图

值随着 ICRF 的加入逐渐减小到 125 keV 左右. 电子逃逸阈值的降低, 使更多的逃逸电子被环向电场加速, 最终逃离本底等离子体撞击到装置器壁上, 由于厚靶 韧致辐射产生硬 X 射线和 GM. 同样, 从图 7 可以看出, 由于 ICRF 的加入, 逃逸阈值减小, 逃逸电子厚靶韧致辐射增强, QM 计数开始增加. 从图 10 可以看出, ICRF 关断以后, 电子逃逸的阈值能量没有明显的变化. 同样, 从图 7 也可以看出, 随着 ICRF 的关断, GM 计数并没有发生很明显的变化, 说明逃逸电子的产生率并没有因为 ICRF 的关断而受到显著的影响. 但是中子信号的计数却因为 ICRF 的关断而变得很少, 说明 ICRF 加热期间的中子信号绝大多数是聚变中子, 而非 GM 光核反应产生的光中子. 只有在 ICRF 关断以后存在的很少的中子计数才有可能是在光核反应产生的中子. 从图 7 的中子计数信号可以看出, ICRF 关断以后 GM 计数仍然保持比较高的计数率, 而此时的中子计数比较少. 因为 GM 和装置的器壁材料(铁)发生光核反应放出中子的阈值能量是 11 MeV, 说明此时绝大多数逃逸电子的能量低于 11 MeV. 但是在 ICRF 加入期间, 中子信号计数比较多, 此时的中子计数是由于 ICRF 的加入使等离子体内部发生聚变反应产生的聚变中子, 说明此时发生了明显的离子加热现象.

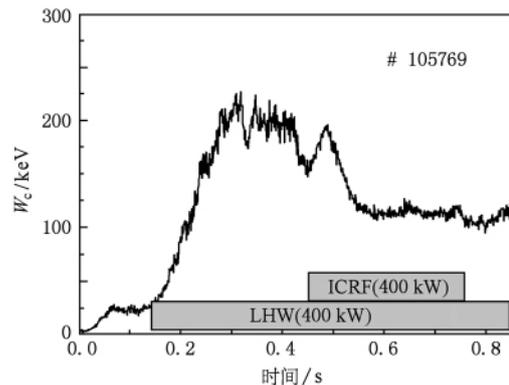


图 10 #105769 逃逸电子的逃逸阈值

5. 结 论

本文研究了 ICRF 和 LHW 加热情况下电子温度的演化过程以及放电过程中的逃逸电子行为, 并且根据实验结果分析了 LHW 对改善 ICRF 和等离子体耦合的重要作用. 研究发现: 一定功率的 LHW 有助于改善 ICRF 和等离子体之间的耦合. ICRF 的加入, 使 LHW 等离子体的杂质辐射功率增加, 相当

离子体密度的增长幅度. 因此, 逃逸电子的逃逸阈

一部分等离子体内能以杂质辐射的形式散发出去, 等离子体的电子温度随之降低. ICRF 对电子逃逸阈值能量的影响将随着 ICRF 功率和等离子体耦合情况的不同而发生变化, 因此, ICRF 和等离子体耦合情况的不同将对逃逸电子的产生率造成影响. 本文

也分析了 ICRF 和 LHW 等离子体中的中子产额问题, 发现 ICRF 投入期间的中子绝大多数是聚变中子, 而非光核反应产生的光中子. ICRF 的投入有利于增加等离子体聚变的反应截面, 增加 Tokamak 等离子体的聚变中子产额.

-
- [1] Qiu L J 2008 *Fusion Energy and The Applications* (Beijing: Science Press) p279 (in Chinese) [邱励俭 2008 聚变能及其应用 (北京: 科学出版社) 第 279 页]
- [2] Fisch N J 1987 *Rev. Mod. Phys.* **59** 175
- [3] Chen Z Y 2006 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [陈忠勇 2006 博士学位论文 (合肥: 中国科学院等离子体物理研究所)]
- [4] Litaudon X, Becoulet A, Crisanti F, Wolf R C 2003 *Nucl. Fusion* **43** 565
- [5] Ide S, Naito O, Oikawa T, Fujita T, Kondoh T, Seki M 2000 *Nucl. Fusion* **40** 445
- [6] Ekedahl A, Baranov Yu F, Dobbing J A, Fischer B, Gormezano C 1998 *Nucl. Fusion* **38** 1397
- [7] Litaudon X, Arslanbekov R, Hoang G T, Joffrin E 1996 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **38** 1603
- [8] Lu H W, Hu L Q, Jiang Y, Lin S Y 2008 *High Power Laser Par. Beams* **20** 747 (in Chinese) [卢洪伟、胡立群、江 勇、林士耀 2008 强激光与粒子束 **20** 747]
- [9] Zhong G Q, Hu L Q, Zhu Y B, Lin S Y, Chen J Q, Xu P, Duan Y M, Lu H W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3262 (in Chinese) [钟国强、胡立群、朱玉宝、林士耀、陈珏铨、许 平、段艳敏、卢洪伟 2009 物理学报 **58** 3262]
- [10] Lu H W, Hu L Q, Lin S Y 2009 *Nuclear Fusion Plasma Phys.* **29** 150 (in Chinese) [卢洪伟、胡立群、林士耀 2009 核聚变与等离子体物理 **29** 150]
- [11] Yang J W, Guo G C, Zhang J L 1984 *Nuclear Fusion Plasma Phys.* **4** 157 (in Chinese) [杨进蔚、郭干城、张金岭 1984 核聚变与等离子体物理 **4** 157]
- [12] Zheng Y Z, Qi C W, Ding X T, Li W Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 294 (in Chinese) [郑永真、齐昌炜、丁玄同、酈文忠 2006 物理学报 **55** 294]

Runaway electrons behaviors during ion cyclotron range of frequency and lower hybrid wave plasmas in the HT-7 Tokamak^{*}

Lu Hong-Wei[†] Hu Li-Qun Zhou Rui-Jie Xu Ping Zhong Guo-Qiang Lin Shi-Yao Wang Shao-Feng

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

(Received 16 November 2009; revised manuscript received 23 April 2010)

Abstract

HT-7 Tokamak is equipped with a lower hybrid wave (LHW) system and an ion cyclotron range of frequency (ICRF) system. ICRF can accelerate ions effectively, while LHW can accelerate electrons effectively. The generation of runaway electrons during the LHW and ICRF plasmas, as well as the time evolution of electron temperature during the ICRF and LHW plasmas was investigated in this paper. The runaway critical energy for runaway electrons was also calculated according to the experimental data. It was observed that the combination of ICRF and LHW can produce a higher heating efficiency and a better coupling between ICRF and plasmas if the power of LHW exceeds a critical value. Therefore, the generation of runaway electrons and fusion neutrons are affected by ICRF.

Keywords: Tokamak, lower hybrid wave, ion cyclotron range of frequency, runaway electron

PACC: 5225, 5250, 5255

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10935004, 10775041).

[†] E-mail: luhw@ipp.ac.cn