

HT-7 托卡马克大功率低混杂波电流 驱动的实验研究^{*}

徐 强[†] 高 翔 单家方 胡立群 赵君煜

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥 230031)

(2008 年 1 月 14 日收到 2008 年 5 月 13 日收到修改稿)

在 HT-7 超导托卡马克成功进行了大功率 ($P_{\text{LHW}} = 100\text{—}800\text{ kW}$, $f = 2.45\text{ GHz}$) 低混杂波电流驱动实验. 研究了不同入射功率和等离子体密度下的低混杂波电流驱动效率. 获得了以平均电子密度增加、氦阿尔法 (D_α) 线辐射减少为特征的粒子约束改善. 粒子约束时间 τ_p 增加了约 1.5 倍. 仔细研究了能量约束时间与等离子体密度和低混杂波功率的关系.

关键词:托卡马克,低混杂波,约束改善,电流驱动效率

PACC:5255, 5235

1. 引 言

20 世纪 80 年代以来,低混杂波电流驱动实验在许多托卡马克装置上取得了很大的进展^[1,2]. 低混杂波实验已定位于探索托卡马克等离子体稳态运行时的电流驱动和电流剖面控制能力的方向上. 而下一步优化等离子体的可改进方面有更高功率和更长驱动时间、电流剖面反馈控制技术的开发、更高效率的低混杂波电流驱动. 在 Tore Supra^[1], TRIAM-1M^[2], FTU^[3], JET^[4], JT-60U^[5] 和 HT-7^[6-10] 等装置上的实验表明,低混杂波电流驱动已经是一个驱动托卡马克等离子体非感应电流的最有效途径. Tore Supra 托卡马克已实现了低混杂波驱动 0.5 MA 的完全非感应电流,并维持了 6 min^[1]. 在 TRIAM-1M 托卡马克上,低混杂波电流驱动的长脉冲放电时间已经超过了 2 h^[2].

HT-7 托卡马克的低混杂波电流驱动实验是从 1998 年开始的^[7]. 发展低混杂波电流驱动的目的主要是维持长脉冲放电和改善等离子体约束^[6,11,12]. HT-7 托卡马克在 2008 年实验中,已经实现了低混杂波驱动的 400 s 长脉冲放电. 在 2007 年春季实验中,进行了大功率(最高注入功率达 0.8 MW, 频率为

2.45 GHz) 低混杂波电流驱动实验. 本文研究 HT-7 超导托卡马克低混杂波电流驱动的实验结果.

2. 实验系统

HT-7 装置是 1994 年由前苏联的 T-7 装置改建的一个中型限制器位形的超导磁体托卡马克^[7,8]. 该装置等离子体大半径为 1.22 m, 圆截面限制器位形, 小半径为 0.27 m. 它有两层厚铜壳, 在铜壳之间是组成纵向磁场的 24 个超导线圈, 磁感应强度 B_z 可达 2.5 T. 通常的运行参数如下: 等离子体电流 $I_p = 100\text{—}250\text{ kA}$, 环向磁场的磁感应强度 $B_t = 2\text{ T}$, 中心弦平均电子密度 $\bar{n}_e = (1\text{—}6) \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$, 中心电子温度 $T_e = 0.5\text{—}3.0\text{ keV}$, 中心离子温度 $T_i = 0.2\text{—}1.5\text{ keV}$. 在放电过程中, 等离子体电流、位置和中心弦平均电子密度由反馈系统控制. 一个不锈钢内衬安装在真空室内半径为 0.32 m 处^[7]. 图 1(a) 给出的是 1994—2008 年 HT-7 长脉冲实验(最长放电时间 $t = 400\text{ s}$) 的进展情况, 表明 HT-7 装置在准稳态运行维持放电研究中取得了很大的进步. 2002 年之前, HT-7 具有一个高场侧的带状限制器和两个带不锈钢热沉的极向水冷石墨限制器. 后来, 随着对等离子体与壁相互作用理解的逐渐深入, 装置的壁

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10475078, 10675127, 10675126, 10675124, 10605028)资助的课题.

[†] E-mail: xuqiang@ipp.ac.cn

条件做了很多技术改进. 使用了热导率高达 180 W/mK 的 GBST1308 掺杂的石墨作为限制器材料, 可以承受 6 MW/m^2 的热负载 60 s . 所有的碳基和限制器以及离子 Bernstein 波 (IBW) 天线 Faraday 屏蔽栅表面都涂有 $100 \mu\text{m}$ 的 SiC 石墨涂层. 在装置内真空室对应于超导线圈的位置安装了 24 块钒钢软磁材料以降低磁场波纹度. 在 2003 年 HT-7 物理实验中实现了放电时间为 60 s 的长脉冲放电 (图 1(a)). 2004 年分别在真空室的顶部和底部新装了一对水冷环向石墨限制器, 并针对 HT-7 长脉冲实验做了测试. HT-7 的低杂波系统的天线也采用镀有 TiN 薄膜的 3×16 多结波导阵天线, 并做了改进. 波功率谱的带宽 Δn_{\parallel} 可调节到 0.6, 发射功率谱的 n_{\parallel} 可以通过子波导相位差的反馈控制, 使得 $n_{\parallel}^{\text{peak}}$ 在 1.25—3.45 范围

内变化, $n_{\parallel}^{\text{peak}}$ 是入射波平行折射率的峰值. 依据最外闭合磁面来调节天线的小半径截面的位置可以优化天线的耦合效果. 为了保护低混杂波天线免受热平衡和非热平衡粒子的高热流损坏, 2005 年的实验中分别在低混杂波天线馈口的电子侧和离子侧安装了防护限制器. 图 1(b) 给出了 2008 年 HT-7 托卡马克实验中 400 s 长脉冲实验的典型放电波形, 其等离子体电流 $I_p = 50 \text{ kA}$, 中心弦平均密度 $\bar{n}_e(0)$ 在 10^{19} m^{-3} 量级, 低混杂波电流驱动功率为 100 kW . 在 HT-7 低混杂波电流驱动放电过程中, 等离子体电流 I_p 由中心欧姆加热场线圈反馈系统控制. 图 1(c) 给出了 HT-7 大功率低混杂波电流驱动放电的典型波形, 低混杂波功率达到了 800 kW .

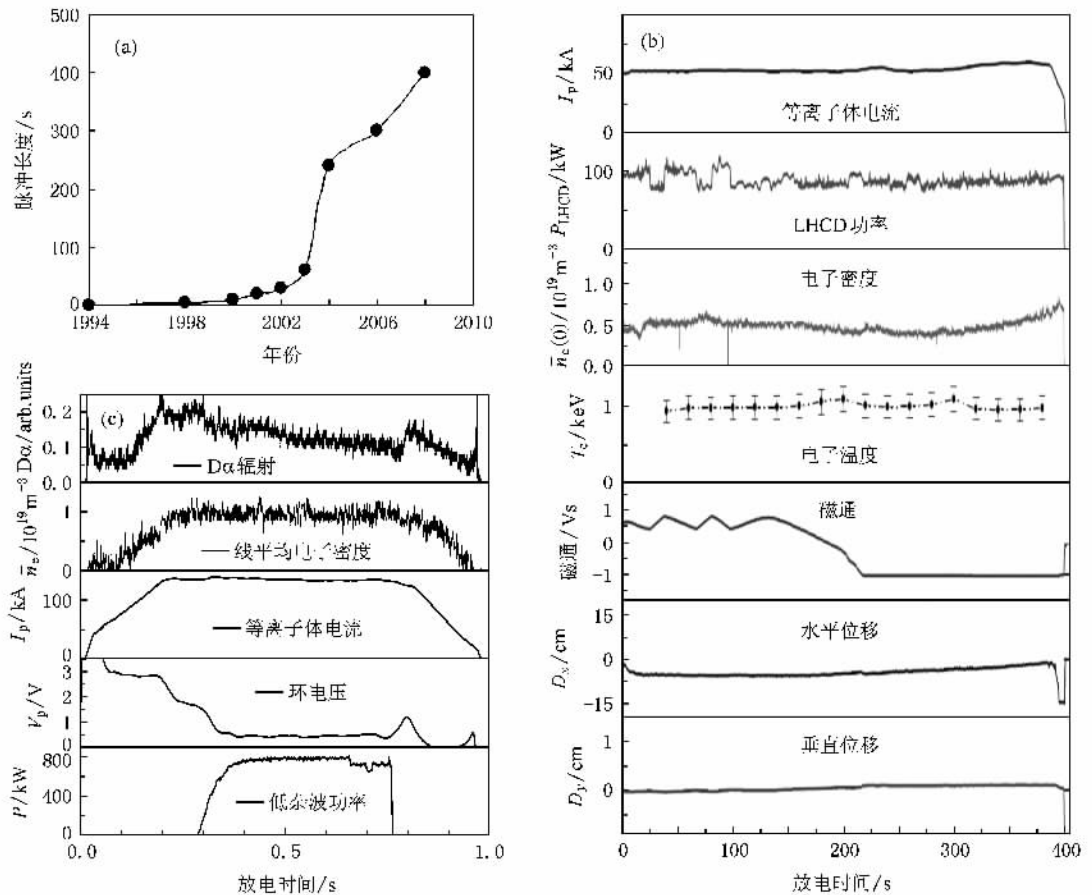


图 1 HT-7 托卡马克长脉冲放电实验进展及放电波形 (a) 1994—2008 年放电实验的进展, 2008 年最长低混杂波电流驱动放电时间达到 400 s (b) 低混杂波电流驱动长脉冲放电的典型波形 (c) 大功率低混杂波电流驱动放电的典型波形

在 HT-7 托卡马克氦等离子体实验中, 主要用到的诊断系统如下: 一台 5 道的以 HCN 为工作气体的激光干涉仪, 测量电子密度径向分布; 一个垂直多道硬 X 射线阵列, 提供 $10\text{--}200 \text{ keV}$ 范围内的快电子

韧致辐射空间和能谱分布^[11, 12]; 一台 46 道软 X 射线能谱仪, 测量全空间的软 X 射线强度, 计算等离子体的电子温度剖面; 中性粒子能谱仪, 分析得到等离子体离子温度信息; 磁测量系统, 提供等离子体电

流、环电压、等离子体位置、内感等信息;光学和光谱诊断系统,包括测量 Z_{eff} 的可见韧致辐射阵列,测量粒子约束时间 τ_p 和再循环的 D_α 线辐射,一台测量粒子和杂质辐射的可见紫外转镜诊断系统等。

3. 低杂波电流驱动效率

我们曾经报道过 HT-7 装置实现数秒的完全非感应电流驱动^[6,40]。根据 Fisch 的热电导理论,在非零环电压放电情况下剩余电场可以加速快电子,从而提高电流驱动效率^[11-16]。在电流驱动效率实验中,等离子体电流在低杂波电流驱动过程中保持为常数。自举电流为一小量,可以忽略,同时假设低杂波驱动电流 I_{rf} 和欧姆驱动电流 I_{OH} 的和不变。电流驱动效率^[11-16]的实验值可由下列方程给出:

$$\eta = -\frac{\Delta V \bar{n}_e R I_p}{V P_{\text{LHW}}}$$

其中 P_{LHW} 是低杂波注入功率, \bar{n}_e 是弦平均电子密度, R 是等离子体大半径, 等离子体电流

$$I_p = I_{\text{rf}} + I_{\text{OH}}$$

这里定义,

$$I_{\text{rf}} = (-\Delta V/V_{\text{OH}})I_p,$$

$$\Delta V = V_{\text{LHW}} - V_{\text{OH}}.$$

在 2007 年 HT-7 实验中,实现了最大功率为 800 kW 的低杂波电流驱动。低杂波功率扫描实验的结果如图 2 所示,低杂波相位角为 0° ,平均电子密度 $\bar{n}_e = 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $B_t = 1.86 \text{ T}$,等离子体电流 I_p 为 130 和 160 kA。从图 2 可以看到,低杂波电流驱动效率随低杂波功率的增加而减小。驱动电流 I_{rf} 随低杂波功率的增加而增加,当低杂波功率 $P_{\text{LHW}} > 300 \text{ kW}$ 时曲线斜率变小,如图 3 所示。由此可见韧致辐射 Z_{eff} 测量和 C_{\parallel} 和 O_{\parallel} 线辐射强度分析可知,这个结果可能是由低杂波功率较高时的杂质行为引起的。随着低杂波功率的增加,增加了杂质含量,提高了 Z_{eff} ,同时低杂波产生的共振电子与背景等离子体碰撞提高了电子温度。驱动效率与电子温度成正比,与 Z_{eff} 成反比。这两个因素共同作用导致了图 3 的结果。在 HT-7 托卡马克上动态杂质控制是一个关键的问题。图 4 所示为低杂波驱动电流随电子密度的变化。从图 4 可看出,低杂波驱动电流(用入射功率 P_{rf} 做归一化, $R I_{\text{rf}}/P_{\text{rf}}$)随电子密度增加而减小。同样的结果也在其他托卡马克装置被

观察到^[3-5],并可很好地被低杂波电流驱动理论解释。

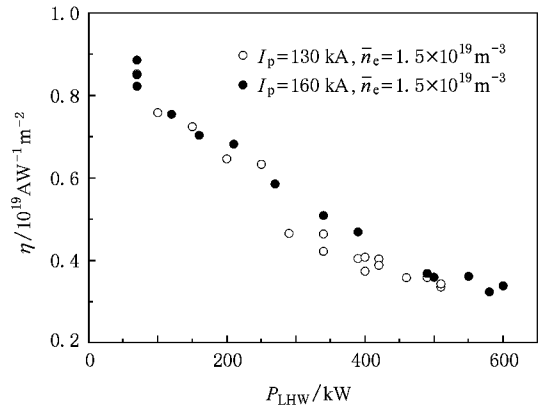


图 2 HT-7 托卡马克上低杂波电流驱动效率随入射功率的变化。等离子体电流为 130 和 160 kA,电子平均密度为 $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。

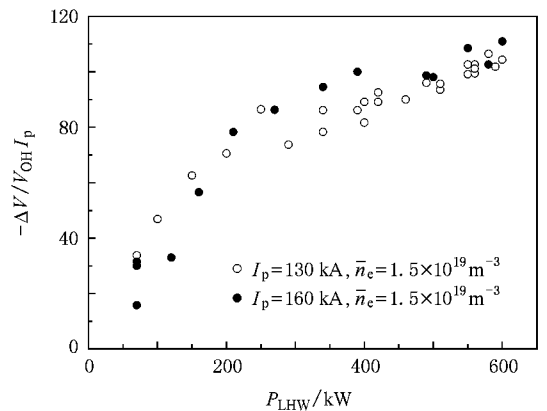


图 3 驱动电流与低杂波功率的关系。等离子体电流为 130 和 160 kA,电子平均密度为 $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。

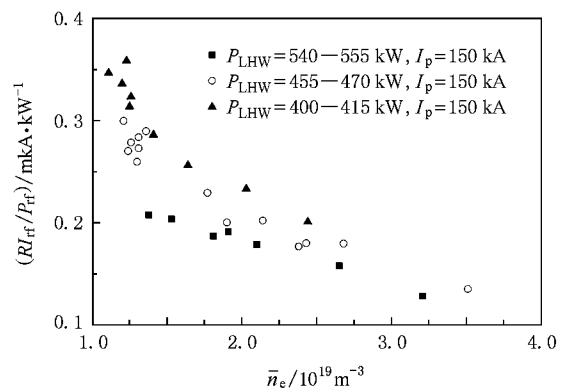


图 4 低杂波驱动电流与电子密度的关系。入射功率为 400—555 kW,等离子体电流为 150 kA。

4. 约束研究

在 HT-7 低混杂波电流驱动实验中粒子约束得到了明显改善. 图 5 所示是低混杂波放电的典型波形. 其参数为 $I_p = 130 \text{ kA}$, $B_t = 1.95 \text{ T}$, $\bar{n}_e = 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_e = 0.8 \text{ keV}$, $T_i = 0.3 \text{ keV}$, $P_{\text{LHW}} = 300 \text{ kW}$, $n_{\text{peak}} = 2.35$. 当低混杂波注入时, 等离子体中心区电子温度从 0.6 keV 增加到 0.8 keV (如图 5 (e) 所示). 环电压从 1.5 V 下降到 0.4 V (图 5 (d)). 图 5 (f) 是注入的低混杂波功率. 当低混杂波注入时, 等离子体线平均密度略有增加 (图 5 (b)), 而 D_α 辐射 (图 5 (a)) 下降. 这时等离子体粒子约束得到了改善. 可计算出在欧姆加热阶段粒子约束时间 τ_p (定义 $\tau_p = N_e / (S_e - dN_e/dt)$, 其中 N_e 是总粒子数, S_e 是粒子通量) 为 15 ms , 在低混杂波电流驱动阶段 $\tau_p = 22 \text{ ms}$. 粒子约束时间约增加了 1.5 倍.

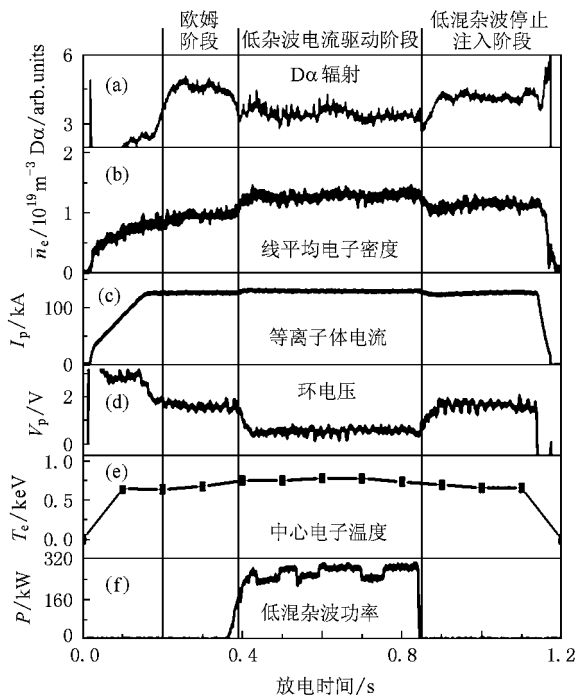


图 5 大功率 (大于 300 kW) 低混杂波放电的典型炮 (炮号 78673) (a) D_α 辐射 (b) 线平均电子密度 (c) 等离子体电流 (d) 等离子体环电压 (e) 中心电子温度 (f) 低混杂波功率

对于低混杂波放电, 等离子体内能和加热功率相关性较弱. 图 6 给出能量约束时间 τ_E 与电子线平均密度的关系. $\tau_E = E / (P - dE/dt)$, 其中 E 是等离

子体内能, P 是注入的功率. 在相同电子密度下, 图 6 中低混杂波电流驱动比欧姆放电情况下等离子体的能量约束时间小. 图 7 给出能量约束时间与低混杂波功率的关系. 能量约束时间 τ_E 随低混杂波功率的增加而减小.

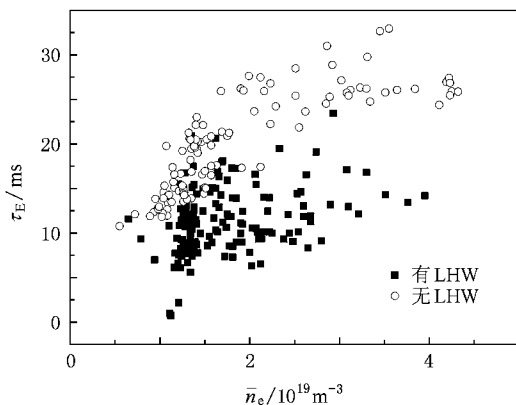


图 6 能量约束时间与电子平均密度的关系 等离子体电流为 120—150 kA

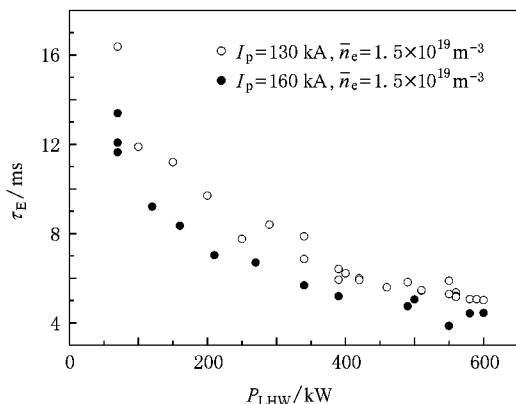


图 7 能量约束时间与低混杂波功率的关系 等离子体电流为 130 和 160 kA 电子平均密度为 $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

HT-7 的等离子体辐射功率是由极端紫外 (XUV) 热辐射仪测量的. 图 8 给出杂质辐射 (C_{III} 线辐射强度、 O_{II} 线辐射强度和 XUV 热辐射仪信号) 与低混杂波功率的实验关系. 大功率低混杂波增加了 HT-7 托卡马克上的杂质含量 (C_{III} 线辐射强度、 O_{II} 线辐射强度), 而杂质行为又增加了等离子体辐射功率, 因此能量约束时间减小. 这在以上的电流驱动效率实验研究中也观察到了. 杂质控制是高功率低混杂波实验的一个关键问题.

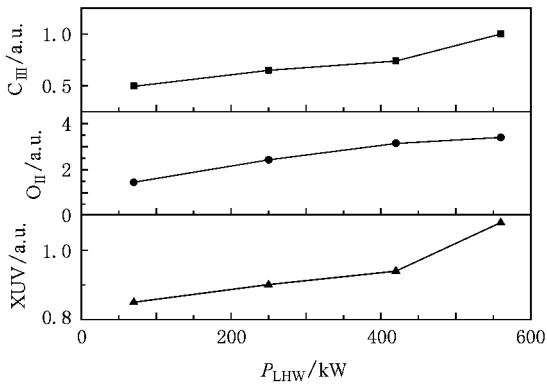


图 8 杂质 C_{III} 和 O_{II} 的线辐射强度和 XUV 热辐射功率与入射低混杂波功率的关系

5. 结 论

在 HT-7 托卡马克开展了低混杂波(最高功率 P_{LHW} 约为 800 kW)的大功率电流驱动实验. 实验可观察到低混杂波电流驱动效率随低混杂波功率增加而减小; 驱动电流随低混杂波功率增加而增加, 在低混杂波功率约为 300 kW 时有一拐点, 低混杂波功率大于 300 kW 时曲线斜率变小; 低混杂波驱动电流 (RI_{rf}/P_{rf}) 随密度增加而减小; 粒子约束时间在低混杂波电流驱动阶段得到了改善; 能量约束时间未观察到改善. 动态杂质控制是今后 HT-7 托卡马克高功率低混杂波实验的关键课题.

- [1] Houtte D V, Martin G, Becoulet A, Bucalossi J, Giruzzi G, Hoang G T, Loarer T, Saoutic B on behalf of the Tore Supra Team 2004 *Nucl. Fusion* **44** L11
- [2] Itoh S, Sato K N, Nakamura K, Zushi H, Sakamoto M, Hanada K, Jotaki E, Makino K, Kawasaki S, Nakashima H, Yoshida N 1999 *Nucl. Fusion* **39** 1257
- [3] Angelini B, Annibaldi S V, Apicella M L, Apruzzese G, Barbato E, Bertocchi A, Bombarda F, Bourdelle C, Bruschi A, Buratti P, Calabro G, Cardinali A, Carraro L, Castaldo C, Centioli C, Cesario R, Cirant S, Cocilovo V, Crisanti F, De Angelis R, De Benedetti M, De Marco F, Esposito B, Frigione D, Gabellieri L, Gandini F, Garzotti L, Giovannozzi E, Gormezano C, Gravanti F, Granucci G, Hoang G T, Iannone F, Kroegler H, Lazzaro E, Leigh M, Maddaluno G, Maffia G, Marinucci M, Marocco D, Martin-Solis J R, Martini F, Mattioli M, Mazzitelli G, Mazzotta C, Mirizzi F, Monari G, Nowak S, Orsotto F, Pacella D, Panaccione L, Panella M, Papitto P, Pericoli-Ridolfini V, Pieroni L, Podda S, Puiatti M E, Ravera G, Regnoli G, Righetti G B, Romanelli F, Romanelli M, Santini F, Sassi M, Saviliev A, Scarin P, Simonetto A, Smeulders P, Stemini E, Sozzi C, Tartoni N, Terranova D, Tilia B, Tuccillo A A, Tudisco O, Valisa M, Vershkov V, Vitale V, Vlad G, Zonca F 2005 *Nucl. Fusion* **45** S227
- [4] Pamela J, Solano E R, JET EFDA Contributors 2003 *Nucl. Fusion* **43** 1540
- [5] Ide S, Fujita T, Naito O, Seki M 1996 *Plasma Phys. Control. Fusion* **38** 1645
- [6] Liu J, Gao X, Hu L Q, Asif M, Chen Z Y, Ding B J, Zhou Q, Liu H Q, Jie Y X, Kong W, Lin S Y, Ding Y H, Gao L, Xu Q, the HT-7 Team 2006 *Phys. Lett. A* **350** 386
- [7] Kuang G L, Xu W H, Zhang X Q, Shan J F, Liu Y X, Liu D C, Zheng G H, Liu F K, Lin J A, Wu J S, Jin Q C, Ding B J, Yang C S, Zhou Y W, Shang L Q, Xu H D, Fan H Y, Fang Y D, Xie J K, Wan Y X 1998 *Chin. Phys. Lett.* **28** 116
- [8] Li J, Wan B N, Luo J R, Kuang G L, Zhao Y P, Zhao J Y, Zhang X D, Liu X N, Fu P, Xie J K, Zhang C, Gu X M, Mao J S, Shan J F, Bai H Y, the HT-7 Team 2003 *Phys. Plasmas* **10** 1653
- [9] Ding B J, Kuang G L, Shan J F, Xu G S, Wan B N, Li J G, the HT-7 Team 2003 *Nucl. Fusion* **43** 558
- [10] Gao X, Li J, Yang Y, Xie J K, Luo J R, Zhao J Y, Gong X Z, Hu L Q, Zhang X D, Shi Y J, Wan B N, Tanaka K, Sakamoto R, Zhao Y P, Kuang G L, Hu J S, Asif M, Jie Y X, Liu H Q, Liu J, Xu Q, Gao L, The HT-7 Team 2005 *J. Nucl. Mater.* **337** 835
- [11] Chen Z Y, Wan B N, Lin S Y, Shi Y J, Hu L Q, Younis J, Gong X Z, Shan J F, Liu F K, Ding B J, Gao X, the HT-7 Team 2006 *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** 1489
- [12] Shi Y J, Chen Z Y, Wan B N, Lv B, Hu L Q, Lin S Y, Hu Q S, Qian J P, Liu H Q, Liu S X, Xu Y C, Shan J F, Li J G 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4930
- [13] Giruzzi G, Barbato E, Bernabei S, Cardinali A 1997 *Nucl. Fusion* **37** 673
- [14] Pankratov I M, Jaspers R, Finken K H, Entrop I, Mank G 1998 *Nucl. Fusion* **38** 279
- [15] Fisch N J 1987 *Rev. Mod. Phys.* **59** 175
- [16] Goniche M, Grosman A, Aniel T, de Michelis C, Gunn J, Mazon D, Schunke B, Segui J L, Vallet J C 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** 899

Experimental study of large power lower hybrid current drive on HT-7 tokamak^{*}

Xu Qiang[†] Gao Xiang Shan Jia-Fang Hu Li-Qun Zhao Jun-Yu

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

(Received 14 January 2008 ; revised manuscript received 13 May 2008)

Abstract

Large power current drive of lower hybrid wave (LHW) was performed (P_{LHW} 100—800 kW at 2.45 GHz) recently in the HT-7 tokamak. The lower hybrid current drive (LHCD) efficiency is studied for different injected powers and for different densities. Improved particle confinement is observed by application of LHCD as characterized by an increase of central line average electron density and decrease of D_α emission. The particle confinement time τ_p increased about 1.5 times compared with ohm discharge. The dependence of energy confinement time τ_E on plasma density and LHW power is experimentally studied in detail.

Keywords : tokamak , low hybrid wave , confinement improvement , current drive efficiency

PACC : 5255 , 5235

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10475078 , 10675127 , 10675126 , 10675124 , 10605028).

[†] E-mail : xuqiang@ipp.ac.cn