DOI:10.19789/j.1004-9398.2017.03.008

低杂波电流驱动下快电子慢化时间的实验研究*

竹锦霞** 涂 朴
(四川文理学院智能制造学院,四川 达州 635000)

摘 要

利用快电子韧致辐射测量系统并采用低杂波功率关断的方法,分析了相同等离子体密度下低杂波功率对快电子慢化时间的作用以及相同低杂波功率下等离子体密度对快电子慢化过程的影响. 实验结果表明: 快电子的慢化时间与等离子体参数间有强依赖关系. 一定等离子体密度下低杂波功率值越高,快电子慢化时间越长. 一定低杂波功率下等离子体密度越高,快电子慢化时间越短. 快电子慢化时间理论分析与实验结果吻合.

关键词: 低杂波电流驱动,快电子,慢化时间.
中图分类号: O53

托卡马克中等离子体的约束在一定程度上依靠环向电流产生的极向场来维持. 在感应式的托卡马克装置上,等离子体电流是依靠变压器的脉冲感应方式驱动作为变压器次级回路的等离子体来维持等离子体电流. 除了变压器伏秒数的限制,脉冲式的放电对装置的材料和寿命影响非常大,为了实现托卡马克长脉冲稳态运行,需要等离子体电流的无感运行. 电子回旋波电流驱动(electron cyclotron current drive,简记为 ECCD)、低杂波电流驱动(lower hybrid current drive,简记为 LHCD)以及中性束(neutral beam injection,简记为 NBI)电流驱动是目前发展的非感应电流驱动. 大量实验证明低杂波电流驱动不仅是托卡马克非感应电流驱动的重要手段,而且也是改善约束,调节电流密度剖面,实现先进位形(如反剪切)和实现长脉冲稳态运行的重要工具[1-3]. 除此之外 LHCD 也是目前为止驱动效率最高的非感应电流驱动[4].

在 LHCD 中,等离子体中满足共振条件的波与电子通过朗道阻尼作用把能量传递给共振电子,其结果使等离子体中的电子偏离了麦克斯韦分布,其能量范围取决于激发波的功率谱,这些电子被称为快电子. 通常 LHCD 实验中环电压会下降,但环电压并不是严格下降为零的,剩余环电压对低杂波驱动的快电子有加速的作用. 快电子的能量范围在几到几百 keV,其速度可接近于电子逃逸的速度阈值,快电子在环形电场作用下可能会被加速到逃逸区. 快电子向逃逸电子的转化也是 LHCD 实验中不可忽视的一个重要问题. 我国装置 HT-7 和 HL-2A 上已经观察到了 LHCD 下超热电子向逃逸电子转化引发逃逸增强的实验现象[5-6]. 然而当快电子和本底等离子体碰撞,快电子则被慢化为热电子,这将减弱快电子的非感应电流驱动效果. 由于快电子与等离子体不稳定性关系密切,以及高通量逃逸电子会严重威胁托卡马克装置的壁材料的安全运行,因此研究快电子的慢化不仅对优化 LHCD 实验有一定的指导意义,而且对寻求抑制逃逸区间有一定指导作用,是下一代大型磁约束装置工程设计、安全运行的物理基础之一.

理论研究快电子的慢化时间与等离子体参数有很强的依赖关系. 本文利用快电子韧致辐射诊断系统,并结合其它相关诊断手段,采用低杂波关断方法研究快电子的慢化时间与低杂波功率、等离子体密度等参数间的关系.

1 低杂波驱动的快电子以及快电子慢化时间

在托卡马克等离子体中不仅低密度的欧姆放电

收稿日期: 2016-07-05
* 四川省教育厅科研重点项目(15ZA0321),四川省教育厅项目(14ZB0314),四川文理学院校级科研项目(2014Z002Z).
**通讯作者 E-mail: zjxlfg@126.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中有大量的快电子存在,而且在辅助加热及 LHCD 过程中会产生高通量的快电子. 这些大量的共振快电子是低杂波通过朗道阻尼作用产生的,理论上快电子和朗道能量公式为[7]:

$$W = m_0c^2\left[N_{//}\left(N_{//}^2 - 1\right)^{-1/2} - 1\right]. \quad (1)$$

式中 m_0 为电子静止质量,c 为光速,$N_{//}$ 为平行折射率(parallel refractive index). 快电子由于低的碰撞频率,可以有效地携带电流,从而实现非感应电流驱动.

在理论上仅考虑电子与电子之间的碰撞条件,快电子的慢化时间主要取决于等离子体参数,即等离子体的密度和电子的速度[8].

$$\tau_{sd} = \frac{4\pi\varepsilon_0 m^2 v_{//}^2}{n_e e^4 \ln\Lambda\left(1 + m/m_0\right)} \propto n_e^{-1} v_{//}^2. \quad (2)$$

式中 ε_0 为真空介电常数,m 为电子质量,$\ln\Lambda$ 为库仑对数,$v_{//}$ 为电子的速度. 从公式(2)可以看出:理论上快电子的慢化时间与等离子体密度成反比,而与快电子的速度(即能量)成正比. ASDEX 装置上采用低杂波功率调制实验详细研究了快电子的约束与等离子体参数的依赖关系[9].

2 实验结果

快电子与本底等离子体中粒子相互作用产生韧致辐射,并辐射出能量范围为 20 ~ 300 keV 的硬 X 射线. 本文利用快电子韧致辐射(FEB)测量系统研究低杂波驱动快电子的动力学. 托卡马克装置上对 FEB 辐射的监测可以得到快电子的能量范围、快电子的动量分布以及角向分布[10]. 实验中采用低杂波功率关断方法,分别研究了相同等离子体密度下不同低杂波功率对快电子慢化时间的影响以及相同低杂波功率下不同等离子体密度对快电子慢化时间的影响作用.

2.1 低杂波功率与快电子慢化时间的关系

为了研究不同低杂波功率对快电子慢化时间的影响效果,实验中在一定等离子体密度条件下进行了低杂波功率的扫描. 放电过程中保持等离子体电流和等离子体密度保持不变($I_p = 80$ kA,$n_e = 1 \times 10^{19}$ m^{-3}),通过投入不同功率的低杂波,测量分析低杂波关断期间的 FEB,从而可得到不同的低杂波功率对快电子慢化时间的影响. 图 1 为低杂波功率为 100 kW(A)和 50 kW(B)的低杂波放电波形. 在 0.18 s 分别投入 100 kW 和 50 kW 的低杂波,在低杂波投入前欧姆放电阶段,两次放电的等离子体电流、等离子体线平均密度以及等离子体表面环电压都保持一致. 随着低杂波的投入 A,B 两次放电的环电压分别从 1.8 V 降到 0.8 V 和 1.2 V. 当低杂波关断后,环电压的值又恢复到了先前欧姆放电阶段值,并且两次放电参数又保持了一致.

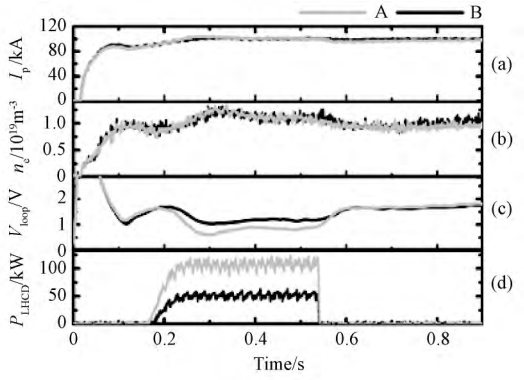


图 1 100 kW(A)和 50 kW(B)的低杂波放电波形
(a)等离子体电流;(b)等离子体线平均密度;(c)等离子体表面环电压;(d)低杂波功率

FEB 来自于快电子韧致辐射贡献,低杂波关断后 FEB 呈现指数衰减,因而快电子的慢化时间可以从测量到的 FEB 衰减得出[11]. 图 2 为低杂波关断时不同能段的 FEB 随时间的演化. 图(a)和图(b)分别对应低杂波功率为 50 kW 和 100 kW 的放电波形. 在低杂波投入期间 FEB 保持相对稳定,但是由于投入的低杂波功率不同,20 ~ 100 keV 能段的硬射线计数图(b)高于图(a). 从图中可以看出 20 ~ 40 keV 以及 40 ~ 60 keV 的低能段 FEB 信号在低杂波关断后呈现指数衰减. 图(a)和图(b)衰减的特征时间分别约为 53 ms 和 69 ms. 因此可以得到快电子的慢化时间分别约为 53 ms 和 69 ms.

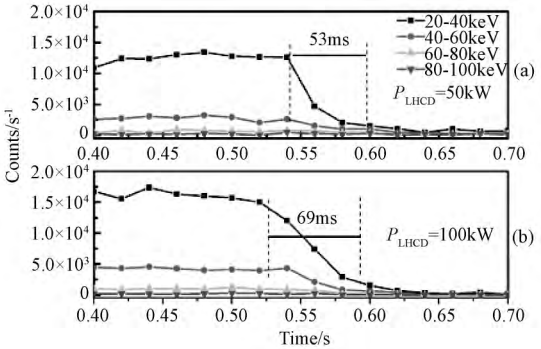


图 2 低杂波关断时不同能段的 FEB 随时间的演化
(a)低杂波功率为 50 kW;(b)低杂波功率为 100 kW

为了进一步研究更高功率的低杂波对快电子慢化时间的影响,对比分析 190 kW 和 50 kW 低杂波

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

放电,放电波形如图 3 所示. 由于投入的低杂波提高到了 190 kW,环电压从 1.8 V 降到 0.5 V. 图 4 为低杂波关断时不同能段的 FEB 随时间的演化. 图(a) 和图(b) 分别对应低杂波功率为 50 kW 和 190 kW 的放电波形. 190 kW 低杂波放电中 20 ~ 100 keV 能段的硬射线计数明显高于 50 kW 低杂波放电. 并且根据图中 FEB 衰减特征时间可得快电子的慢化时间分别约为 53 ms 和 72 ms.

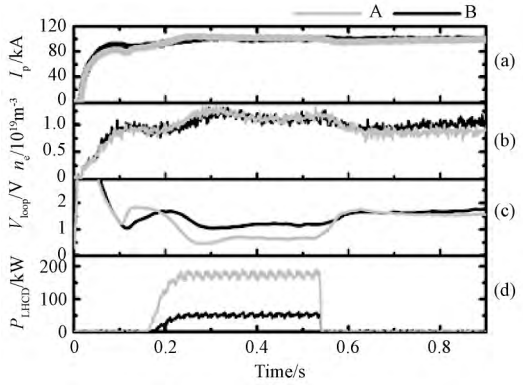


图 3　190 kW (A) 和 50 kW(B) 的低杂波放电波形
(a) 等离子体电流; (b) 等离子体线平均密度; (c) 等离子体表面环电压; (d) 低杂波功率

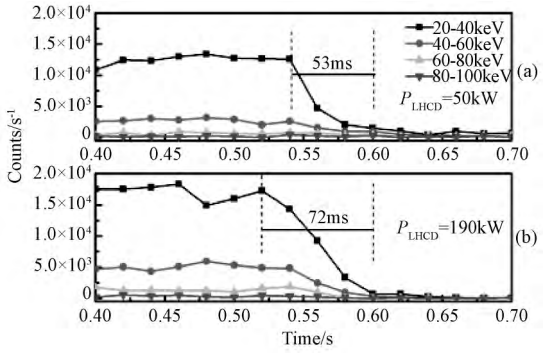


图 4　低杂波关断时不同能段的 FEB 随时间的演化
(a) 低杂波功率为 50 kW; (b) 低杂波功率为 190 kW

从图 2 和图 4 的对比中可得到在等离子体密度相同的放电条件下,投入的低杂波功率越高,在低杂波关断时低杂波所驱动的快电子的慢化时间越长.

2.2　等离子体密度与快电子慢化时间的关系

快电子慢化主要是因为和本底等离子体碰撞引起的. 快电子的慢化时间除了受低杂波功率值的影响外,还与等离子体密度这个参量有很强的关系. ASDEX 利用低杂波功率调制的方法研究发现快电子的慢化时间与等离子体密度成反比[9].

为了研究相同低杂波功率下,不同等离子体密度对快电子慢化时间的影响作用,实验中在一定低杂波功率平台下进行了等离子体密度扫描. 图 5 为低杂波功率相同,等离子密度分别为 $n_e = 1 \times 10^{19}$ m^{-3},$n_e = 1.5 \times 10^{19}$ m^{-3} 和 $n_e = 2 \times 10^{19}$ m^{-3} 的放电波形. 图中从上到下依次为等离子体表面环电压,低杂波功率和等离子体线平均密度,低杂波投入的时间段为 0.25 ~ 0.5 s.

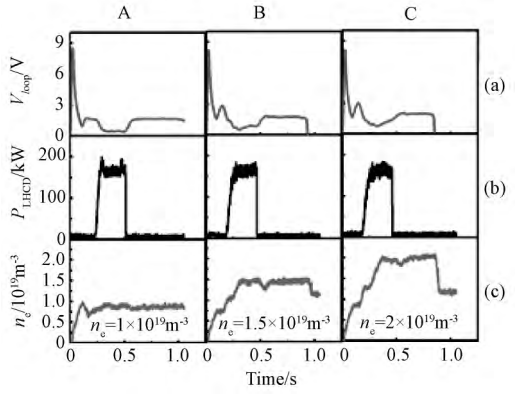


图 5　A、B、C 分别为等离子体线平均密度为 1,1.5 和 2(单位为 10^{19} m^{-3}) 的低杂波放电波形　(a) 等离子体表面环电压; (b) 低杂波功率; (c) 等离子体线平均密度

在投入相同低杂波功率,不同等离子体密度条件 LHCD 关断后,四个不同能量段的 FEB 随时间演化如图 6 所示. 图(a) 、图(b) 和图(c) 分别为低杂波功率为 180 kW,等离子体密度分别为 $n_e = 1 \times 10^{19}$ m^{-3},$n_e = 1.5 \times 10^{19}$ m^{-3} 和 $n_e = 2 \times 10^{19}$ m^{-3} 的放电波形. 低能段 20 ~ 40 keV 的 FEB 信号在低杂波关断后随时间的推移而不断衰减,衰减特征分别约为 51 ms,43 ms 和 27 ms. 从图 5,图 6 可以看出快电子的慢化时间与等离子体密度值有关系,并且随着等离子体密度的提高,快电子的慢化时间变短. 实验结果与公式(2) 中的理论分析吻合.

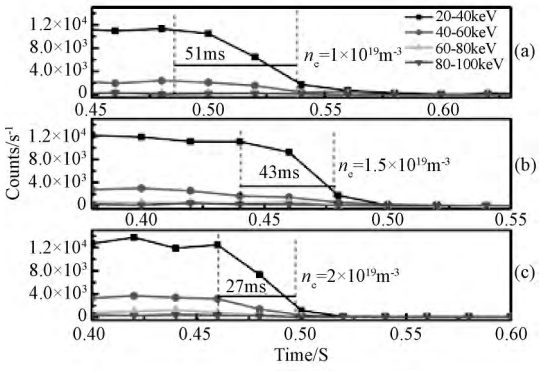


图 6　低杂波关断时不同能段的 FEB 随时间的演化,(a) 、(b) 和(c) 分别对应密度为 $n_e = 1 \times 10^{19}$ m^{-3},$n_e = 1.5 \times 10^{19}$ m^{-3} 和 $n_e = 2 \times 10^{19}$ m^{-3}

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结 论

快电子的行为是托卡马克等离子体实验研究的重要内容. 由于快电子和本底等离子体碰撞发生慢化现象. 慢化时间和等离子体参数有关系. 本文利用 FEB 测量系统,利用低杂波关断的方法研究了快电子慢化时间与投入的低杂波功率以及等离子体密度间的关系. 实验结果表明: 在等离子体密度相同的放电条件下,投入的低杂波功率越高,在低杂波关断时低杂波所驱动的快电子的慢化时间越长; 而在相同低杂波功率条件下,等离子体密度越高,快电子的慢化时间越短. 快电子慢化时间理论分析与实验结果吻合.

参 考 文 献

[1] Litaudon X,Peysson Y,Aniel T,et al. q-Profile evolution and improved core electron confinement in the full current drive operation on Tore Supra [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion,2001,43(5):677 - 693.

[2] Chen Z Y,Wan B N,Ling B L,et al. Enhancement of runaway production in lower hybrid current driven plasma with IBW heating in the HT-7 tokamak [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion,2008,50(1):015001.

[3] 段文学,吴斌. 低杂波电流驱动中径向扩散效应的数值模拟 [J]. 原子与分子物理学报,2010,27(6):1213 - 1216.

[4] Fisch N J. Theory of current drive in plasmas [J]. Rev Mod Phys,1987,59(1):175 - 234.

[5] Chen Z Y,Wan B N,Lin S Y,et al. Dynamics of runaway electrons in lower hybrid current drive plasmas in the HT-7 tokamak [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion,2006,48(10):1489 - 1499.

[6] Zhu J X,Yao L M,Zhang Y P,et al. Behaviour of runaway electrons in the HL-2A plasmas with LHCD and ECCD [J]. Journal of Plasma Physics,2015,81(6): 475810602.

[7] Martin-Solis J R,Esposito B,Sanchez R,et al. Comparison of runaway dynamics in LH and ECRH heated discharges in the Frascati tokamak upgrade [J]. Nuclear Fusion,2005,45(12):1524.

[8] Ushigusa K. Lower hybrid current drive in tokamak plasmas [R]. Japan: Japan Atomic Energy Research Institute,1999.

[9] Bartiromo R,Barbato E,Gabellieri L,et al. Fast electron confinement during lower hybrid experiments in ASDEX [J]. Nuclear Fusion,1993,33(10):1483 - 1492.

[10] Zhang Y P,Liu Y,Song X Y,et al. Measurements of the fast electron bremsstrahlung emission during electron cyclotron resonance heating in the HL-2A tokamak [J]. Review of Scientific Instruments,2010,81(10):103501.

[11] Chen Z Y,Fang D,Dai F,et al. Transport of fast electrons in lower hybrid current drive plasmas in the HT-7 tokamak [J]. Physica Scripta,2011,83(4):045502.

Experimental Investigation of the Slowing-Down Time of Fast Electrons in Lower Hybrid Current Drive Plasmas

Zhu Jinxia Tu Pu

(School of Intelligent Monufacturing, Sichuan University of Arts and Sciences, Dazhou Sichuan 635000)

Abstract

By using FEB system, the value of lower hybrid wave power and the plasma density on the influence of slowing-down time of fast electrons have been analyzed. The results show that the slowing-down time of fast electrons is proportional to the lower hybrid wave power, and it is inversely proportional to the plasma electrons density. The experimental results are in well agreement with slowing-time theory.

Key words: lower hybrid current drive, fast electrons, slowing-down time.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net