

HT-7 托卡马克等离子体 slide-away 放电研究*

卢洪伟 胡立群 林士耀 钟国强 周瑞杰 张继宗

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2009 年 8 月 24 日收到; 2009 年 11 月 23 日收到修改稿)

在 HT-7 托卡马克上, 只在等离子体放电击穿阶段充气, 击穿后关闭充气阀门, 让装置内真空室器壁的出气维持放电的进行, 通过密度衰减实现了 slide-away 放电. 实验分析了不同等离子体电流平台下的 slide-away 放电模式的密度阈值, 以及相同充气量的条件下放电等离子体电流对实现 slide-away 放电的影响. 研究了 slide-away 放电模式下密度提升对等离子体放电状态的影响. 结果发现, slide-away 放电模式下的密度提升使得 H_α 线辐射强度增强, 等离子体中超热电子的约束性能变差, 等离子体芯部的超热电子减少, 高能逃逸电子厚靶致辐射增加.

关键词: slide-away 放电, 托卡马克, 等离子体, 逃逸电子

PACC: 5225, 5255

1. 引 言

在托卡马克等离子体中, 放电等离子体密度较低的时候, 容易形成逃逸放电. 如果放电等离子体密度继续降低, 达到一定的密度阈值条件, 逃逸电子束不稳定性有可能被激发, 逃逸电子的垂直能量迅速增加, 平行能量减小, Pitch 角增加, 同步辐射增强, 使得逃逸电子能量进一步减小. 放电将有可能进入 slide-away 放电状态, 此时的等离子体电流相当部分是由超热电子携带的, 此时等离子体内部存在大量的超热电子. 因此, 也可以说, 与逃逸放电相比, slide-away 放电等离子体中的超热电子具有相对高的约束状态. slide-away 放电只是逃逸放电的一种形式. 在托卡马克等离子体中由于环电压的存在, 使得电子的分布函数偏离麦克斯韦分布. 特别是在低密度放电中, 大量的热电子可以被环电压被加速到 100 keV 的量级. 如果等离子体密度继续降低, 达到一定的密度阈值, 放电将进入 slide-away 放电状态. 在这种放电状态下, 由于等离子体电流是主要由超热电子携带, 此时维持等离子体电流所需要的欧姆加热场减小, 与逃逸放电相比, slide-away 放电等离子体中超热电子的约束状态变好, 电子回旋辐射增强.

等离子体中的热电子在环电压的加速下能量

逐渐增加, 电子在等离子体中由于库伦相互作用而受到的阻尼力与电子速度的平方成反比, 而放电过程中的感应电场是基本不变的. 当电子受到的碰撞阻尼作用和电场的加速作用相互抵消的时候, 称电子所对应的能量为电子逃逸的阈值能量, 此时的电子称之为“逃逸电子”. 随着电子速度的进一步增加, 电子的横向能量也将随着电场的加速而增加, 电子的回旋半径和轨道漂移的增加, 最终逃逸电子将脱离等离子体与装置的器壁发生碰撞. 同样根据电离气体动力学理论^[1]: 在托卡马克热等离子体中, 逃逸电子的存在也是不可避免的. 而大量高能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溶化或产生溅射, 从而影响装置的运行寿命^[2]. 而且逃逸电子和装置器壁发生碰撞的过程中将产生大量的杂质, 杂质的存在必将增加等离子体的辐射损失^[3]. 特别是对于将要建造的国际热核试验聚变堆(ITER). 在 ITER 放电过程中将产生大量的高能量逃逸电子, 这些高能逃逸电子由于一些不稳定性以及放电的终止最终将在很短的时间内损失殆尽. 因此逃逸电子已经成为一个与 ITER 相关的热门研究课题. 在国内外托卡马克装置上, 比如, JT-60U^[4], TORE SUPRA^[5], TFTR^[6], JET^[7,8], HT-7^[9] 和 HL-2A^[10,11], 都对逃逸电子进行了相关研究.

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

E-mail: luhw@ipp.ac.cn

由于等离子体中的快电子(能量大约 30—250 keV)在沿着托卡马克中的磁力线运动的过程中,和本底等离子体由于库伦相互作用,会发出韧致辐射;韧致辐射的能量范围在硬 X 射线波段.在 HT-7 托卡马克上,使用 CdTe 探测器测量托卡马克等离子体中的快电子韧致辐射,通过快电子韧致辐射得到等离子体中的快电子时间空间演化信息.等离子体中的逃逸电子随着放电的进行最终会损失到托卡马克的器壁上,逃逸电子和装置材料原子的内层电子相互作用,使得原子的内层电子向高能级跃迁;当高能级上的电子向低能级跃迁时会发射更高能量的硬 X 射线;由于逃逸电子在装置器壁材料上受到的是强相互作用,因此称之为厚靶韧致辐射.使用 NaI(TL)闪烁体探测器测量逃逸电子和装置器壁厚靶韧致辐射产生的高能量的硬 X 射线.

2. 不同等离子体电流条件下的 slide-away 放电

2.1. 不同电流平台下的密度阈值

在 HT-7 托卡马克上,只在放电击穿阶段充气,击穿后关闭充气阀门,仅依靠装置内真空室器壁的出气维持放电的进行,通过密度衰减实现了 slide-away 放电,如图 1 所示.由于放电过程中的充气阀门已经关闭,随着放电的进行,装置器壁的出气量会减小,因此等离子体密度将随着放电的进行而减小.当密度降低到一定的密度阈值时,放电进入 slide-away 放电状态.其标志是环电压降低,电子回旋辐射增强,超热电子的约束状态变好.此时相当部分的等离子体电流由超热电子携带.在欧姆放电等离子体中,只有在等离子体密度不是很低的情况下 ECE 才能正确反映电子温度;当等离子体密度很低的时候,等离子体是光学薄的,等离子体中存在大量的超热电子,由于超热电子回旋频率的下移,使得超热电子的回旋频率降低到 ECE 诊断的测量范围之内,此时的电子回旋辐射信号主要是由超热电子的电子回旋辐射决定的,而非由等离子体的电子温度决定.因此低密度放电中的 ECE 信号反应的是超热电子信息.

实验研究了在 slide-away 放电状态下,相同充气量条件下不同等离子体电流对密度阈值的影响.从图 1 可以看出,在 95 kA 等离子体电流条件下

(#76762)的密度阈值是 $n_e = 0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,在电流 85 kA 等离子体电流条件下(#76750)的密度阈值是 $n_e = 0.42 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$.因此可以得出相同充气量的前提下,等离子体电流越大放电进入 slide-away 放电的密度阈值越大.由于等离子体的电阻率

$$\eta_s = 0.51 \frac{m_e^{1/2} e^2 \ln}{3 \omega_p^2 (2 T_e)^{3/2}} T_e^{3/2} \text{ 和电子温度的 } 3/2$$

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.从图 1 可以看出,放电进入 slide-away 放电以后,等离子体的环电压下降到一个很低的水平,说明此时的等离子体电导率很大,电阻率很小,此时的等离子体电流相当部分主要是由超热电子携带的.

图 1 #76762 和 #76750 放电波形图 (I_p) 等离子体电流, (V_{loop}) 等离子体环电压, (n_e) 等离子体中心线平均密度, (GP) 充气阀门的电压信号, (ECE) 电子回旋辐射强度, (H) H 线辐射强度

2.2. 不同充气量条件下的密度演化

实验研究了不同充气量情况下 slide-away 放电模式的密度演化行为.如图 1 和图 2 所示,图 1 中 #76750 和 #76762 的充气量较小,而图 2 中 #104253 和 #104254 的充气量较大.#104253 和 #104254 放电的在充气量相同,在 55 kA 的电流平台下, #104253 放电的等离子体密度由 $n_e = 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 降低到了 $n_e = 0.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 左右,等离子体密度达到了

slide-away 放电的密度阈值, 放电进入 slide-away 放电状态. 在 75 kA 的电流平台下, #104254 放电的等离子体密度达到了 $n_e = 0.65 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 而且并没有明显的降低, 放电等离子体密度没达到逃逸电子束不稳定性的密度阈值, 没有形成 slide-away 放电. 因此, 在一定充气量的前提下, 较小的放电等离子体电流更有利于 slide-away 放电模式的实现.

而在相对比较小的充气量情况下 (如图 1 所示), 即使放电等离子体电流达到 95 kA, 初始等离子体密度达到了 $n_e = 0.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 但是等离子体密度很快降低到了 $n_e = 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 左右, 等离子体实现了 slide-away 放电模式. 等离子体进入 slide-away 放电状态以后, 相当部分的等离子体电流是由超热电子携带, 由于此时等离子体的电阻率较小, 因此维持相同等离子体电流所需要的环电压较低. 从环电压的降低幅度来看, #104253 放电的环电压由初始欧姆放电的 1.5 V 降低到了 slide-away 放电阶段的 1.0 V 左右. 而在 #76762 放电中, 较小的充气量使得放电的环电压从初始时期的 1.7 V 降低到 0.8 V 左右. 因此可以看出, 较大的放电等离子体电流和较小的充气量更容易实现 slide-away 放电模式.

3. 密度提升对等离子体行为的影响

如图 3 所示, 从 #104267 和 #104268 放电的波形可以看出, 仅在放电的击穿阶段充入一定量的气体, 等离子体密度从 $n_e = 0.35 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 开始降低, 在 0.43 s 当密度降低到 $n_e = 0.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 左右的时候放电进入 slide-away 放电状态. 两次放电都在击穿阶段冲入相同气量的放电气体, 两次放电都是在同一时刻进入 slide-away 放电状态, 说明放电具有很好的可重复性. 从图 3 可以看出, 在 #104267 放电进入 slide-away 以后, 在 0.66 s 充入一定气量的放电气体, 随着气体的充入, 等离子体密度开始增加, H 线辐射、快电子韧致辐射、逃逸电子厚靶韧致辐射也开始增强. 比较 #104267 和 #104268 两炮放电的波形可以看出, 在 #104267 slide-away 放电阶段的额外充气使得放电后期的等离子体密度高于 #104268 slide-away 放电阶段的等离子体密度. 因此在 #104267 放电的后期产生了较高的环电压.

图 2 #104253 和 #104254 放电波形图 (I_p) 等离子体电流, (V_{loop}) 等离子体环电压, (n_e) 等离子体中心线平均密度, (GP) 充气阀门的电压信号, (ECE) 电子回旋辐射强度, (H) H 线辐射强度

图 3 #104267 和 #104268 放电波形图 (I_p) 等离子体电流, (V_{loop}) 等离子体环电压, (n_e) 等离子体中心线平均密度, (GP) 充气阀门的电压信号, (ECE) 电子回旋辐射强度, (H) H 线辐射强度, (RA) 逃逸电子厚靶韧致辐射强度, (FEB) 快电子韧致辐射强度

从图 3 中逃逸电子厚靶致辐射信号 (RA) 可以看出, 随着等离子体进入 slide-away 放电状态, 逃逸电子厚靶致辐射有逐渐减少的趋势. 同时, 随着 slide-away 放电状态被破坏, 逃逸电子厚靶致辐射和 H 线辐射迅速增强, 电子回旋辐射减弱, 超热电子约束状态变差. 具体的物理过程如图 4 所示, 充气阀门在 $t_1 = 660$ ms 开始充气, 由于气体的扩散, 首先是中性氢的线辐射 (H 线辐射) 在 $t_2 = 675$ ms 开始增加. 因此可以推断气体从充气口到达等离子体的时间大约需要 $t_2 - t_1 = 15$ ms. 在 $t_3 = 687$ ms 电子回旋辐射开始降低、等离子体密度开始增加, 说明中性气体在 687 ms 被电离成为等离子体. 充气阀门在 $t_4 = 710$ ms 关闭, H 线辐射开始减小, 等离子体密度在 $t_5 = 720$ ms 达到最大值 $n_e = 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 时间延迟 $t_5 - t_4 = 10$ ms. slide-away 放电阶段的充气打破了 slide-away 放电中超热电子较好的约束状态, 使放电重新回到短暂的逃逸放电状态. 从而逃逸电子损失比较严重. 从图 4 也可以看出, 由于充气使得超热电子约束状态变差, 因此 H 线辐射强度在充气以后开始增强, 而且逃逸电子厚靶致辐

射信号 (RA) 在充气以后也开始增强. 说明逃逸电子逃离本底等离子体的数目增多. slide-away 放电阶段的充气引起了逃逸电子辐射的增强, 使得等离子体内部的逃逸电子逃离等离子体, 撞击到装置的器壁上. 在等离子体密度到达最大值以前, 超热电子和中性气体发生碰撞, 使中性气体电离, 等离子体密度增加, 超热电子减少, 电子回旋辐射强度降低. 但是当等离子体密度到达最大值以后, 电子回旋辐射仍然有一段时间的降低趋势, 主要是由于中性气体的加入, 等离子体密度的增加, 放电偏离 slide-away 放电状态, 等离子体中超热电子的约束性能变差 (H 线辐射较大), 因此导致大量的逃逸电子从等离子体芯部逃离本底等离子体; 使得本底等离子体中的逃逸电子数目减小. 因此电子回旋辐射在等离子体密度达到最大值以后还有一短时间的下降趋势.

图 4 脉冲充气对等离子体行为的影响 (V_{loop}) 等离子体环电压, (n_e) 等离子体中心线平均密度, (GP) 充气阀门的电压信号, (H) H 线辐射强度, (ECE) 电子回旋辐射强度, (RA) 逃逸电子厚靶致辐射强度

图 5 #104267 放电过程中逃逸电子能谱

图 6 #104268 放电过程中逃逸电子能谱

从图 5 可以看出, #104267 放电过程中, 能量范围在 5.0—9.5 MeV 内的高能逃逸电子计数(表现

为高能硬 x 射线), 在 0.7—0.8 s 之间有个明显的增加. 而能量范围在 1.0—3.5 MeV 内的逃逸电子计数则没有明显的变化. slide-away 放电下的充气引起了高能逃逸电子的损失. 而对于放电 #104268 (如图 6), 在 slide-away 放电过程中则没有明显的高能逃逸电子厚靶韧致辐射增强的迹象.

4. 结 论

本文报道了 HT-7 托卡马克上 slide-away 放电

的初步研究结果. 研究结果发现: 相同充气量的前提下, 等离子体电流越大, 放电进入 slide-away 放电的密度阈值越大. 而且, 等离子体击穿阶段较小的充气量更容易使托卡马克等离子体进入 slide-away 放电模式. 通过 slide-away 放电阶段的再充气, 研究了 slide-away 放电阶段的密度提升对等离子体行为的影响. 结果发现 slide-away 放电阶段的密度提升使得等离子体中超热电子的约束性能变差, 等离子体内部的超热电子减少, 高能逃逸电子厚靶韧致辐射增加.

-
- [1] Liu C L, Chen J F, Guo G C, 1984 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **4** 150 (in Chinese) [刘常禄、陈杰夫、郭干城 1984 核聚变与等离子体物理 **4** 150]
- [2] Lu H W, Hu L Q, Jiang Y, Lin S Y 2008 *High Power Laser and Particle 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]
- [3] Xu W, Wan B N, Xie J K 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1970 (in Chinese) [徐 伟、万宝年、谢纪康 2003 物理学报 **52** 1970]
- [4] Yoshino R, Tokuda S 2000 *Nucl. Fusion* **40** 1293
- [5] Martin G 1998 *Proceedings of the 25th EPS Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion*, Prague, Czech Republic, 1998, Vol 22C Report p3-006
- [6] Fredricson E D, Sabbagh S A, Bell M G 1997 *Phys. Plasmas* **4** 1589
- [7] Gill R D, Alper B, de Baar M 2002 *Nucl. Fusion* **42** 1039
- [8] Riccardo V 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** A269
- [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] Yang J W, Guo G C, Zhang J L 1984 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **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]
- [11] 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、酆文忠 2006 物理学报 **55** 294]

Investigation of slide-away discharges in HT-7 tokamak^{*}

Lu Hong-Wei Hu Li-Qun Lin Shi-Yao Zhong Guo-Qiang Zhou Rui-Jie Zhang Ji-Zong

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

(Received 24 August 2009; revised manuscript received 23 November 2009)

Abstract

In tokamak plasmas, the discharge will turn into “runaway” discharge if the density decays to a critical one. The discharge will enter into “slide-away” discharge if the density reaches a lower level. The slide-away discharge is characterized by high confinement of superthermal electrons which constitute a large part of plasma current. In HT-7 Tokamak, the slide-away discharge is achieved by reducing the plasma density. The relationship between plasma current and critical density of slide-away discharge is investigated. It is also found that the increase of density in slide-away discharge can make the confinement of superthermal electrons poor and lots of superthermal electrons lost from the vacuum chamber.

Keywords: slide-away discharge, tokamak, plasma, runaway electron

PACC: 5225, 5255

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10675124) .

E-mail: huhw@ipp.ac.cn