

用激光吹气注入高 Z 杂质使 HL-1M 托卡马克 放电安全终止的研究

郑永真[†] 冯兴亚 郑银甲 郭干城 徐德明 邓中朝

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

(2004 年 7 月 13 日收到, 2004 年 9 月 13 日收到修改稿)

采用高 Z 杂质注入 HL-1M 等离子体中, 触发等离子体电流衰竭的实验已经施行. 用激光吹气注入高 Z 杂质能够增加辐射冷却, 等离子体在 $\sim 3\text{ms}$ 时间内迅速冷却而且在电流终止之前电子温度损失约 80%. 实验证明: 它是一种使得大型聚变实验装置上在放电破裂之前显著减少等离子体中热能而且安全终止放电的简单、快速和有效的途径.

关键词: 高 Z 杂质, 破裂, 等离子体终止, 激光吹气

PACC: 5270, 5255P

1. 引 言

国际上现代聚变实验的大装置纷纷发现破裂放电而导致电流突然中止, 造成装置遭受重大的危害, 因为等离子体能量熄灭阶段存在强烈的热通量, 而且在等离子体电流熄灭阶段中产生强烈的逃逸电子, 使得装置第一壁材料可运行的时间大大缩减, 同时在真空器壁上产生很强的电磁力. 所以, 必须在大装置上建立一种避免或软化能量突然衰竭与电流突然衰竭, 并且控制预计的放电破裂或突然终止放电的重要措施.

在破裂时装置放电终止, 等离子体电流密切相关的热能与磁场能必须都被安全衰竭^[1]. 若有效的控制被维持, 则杂质辐射既可以使热能耗竭又可以使磁场能耗竭^[2]. 在磁场能耗竭之前, 热能往往在热能衰竭阶段 ($0.2\text{—}0.5\text{ms}$) 时间内衰减到很小值. 因而, 在热能衰竭之前, 高辐射阻性等等离子体可消耗热能和磁能, 并且减少了局部区域的耗竭. 用激光吹气注入高 Z 杂质能够产生高辐射阻性等等离子体, 增加辐射冷却, 以便使托卡马克放电在破裂时可以安全终止. 这是一种在破裂前使得等离子体热能和磁能显著减少的途径. T-10 上也用注入高 Z 杂质 (KCl) 弹丸^[3], 作为同类应用. 该文章叙述在 HL-1M

采用激光吹气注入铝 (Al), 获得使等离子体放电安全地终止的途径.

2. 实验结果

实验的主要目的是在热能衰竭之前获得阻性的高辐射的等离子体, 并增加由高 Z 杂质辐射导致的等离子体的冷却效果. 此辐射源是由激光吹气注入 Al 杂质或 Fe 杂质产生. 激光器输出能量为 $1\text{—}3\text{J}$, 脉冲宽度为 $20\text{—}30\text{ns}$ 的激光束聚焦在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的金属膜上, 形成金属气体, 并向等离子体芯区移动. 图 1 给出激光吹气系统的布置. 激光在金属膜上形成直径 $\phi 3\text{—}6\text{mm}$ 光斑, 一次吹气可产生大约 10^{19} 个金属元素的原子, 经电离、碰撞、扩散, 向约束区 ($r/a < 3/5$) 和芯区 ($r/a \sim 1/5$) 移动, 如果它们全部分布在等离子体约束区和芯区, 相当于等离子体中约束区和芯区的电子密度^[4]. 已经由注入等离子体中的 Al 杂质的真空紫外光谱的绝对测量与杂质输运码 SITCODE 的模拟所得到的铝杂质浓度所证实^[4]. 其中部分金属原子可穿越约束区, 到达芯区. 靶容器装在真空室的顶部, 注入点离等离子体边缘约 0.9m , 而这些入射中性粒子, 在小于 1ms 时间内就到达等离子体边缘 0.9 半径处, 此处其能量测量值为几个 eV. 这些原子在边缘电离, 并且电离后

[†]E-mail: yz.zheng@swip.ac.cn

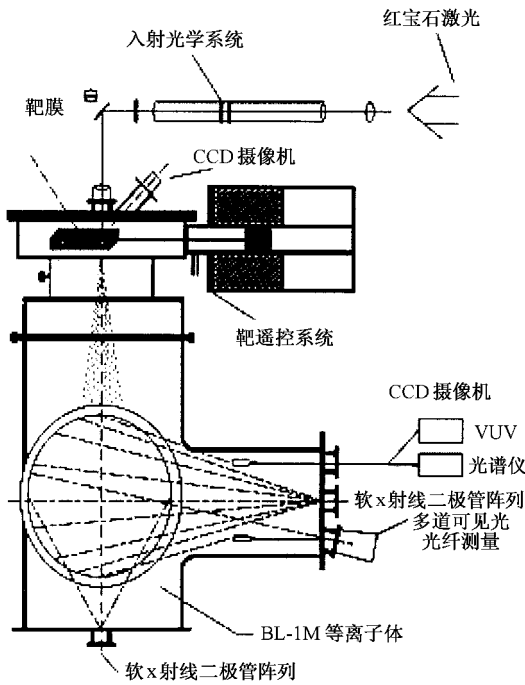


图 1 激光吹气注入杂质系统的布置

离子和电子快速分离,离子和电子分别沿环向场的场线以 10^4 m/s 的环向速度向相反方向移动.同时由于碰撞或湍流的缘故,离子向里径向移动是呈现扩散过程,而以典型速率 1—10 m/s 径向向里缓慢移动;用软 x 射线阵列的测量谱和 CCD 相机拍摄图均可观察杂质注入等离子体中的穿透过程,穿透半径为 22cm.用真空紫外光谱仪测量了的注入杂质电离级 (Al^{10+} , Al^{11+} 和 Al^{12+}) 的演变过程.杂质粒子通常抵达小半径的一半距离 ($a/2$) 处产生最大沉积.

在杂质注入之前的等离子体参数如下:等离子体电流 $I_p \sim 150$ A,环向场 $B_T \sim 2$ T,电子温度 $T_e \sim (0.6-1.2)$ keV,线平均电子密度 $\bar{n}_e \sim (2-3) \times 10^{19} m^{-3}$.等离子体的行为随注入杂质数量与等离子体的电子密度而改变.当注入杂质浓度小于电子密度的 0.01%,可稍引起一些扰动,即 $\Delta \bar{n}_e / \bar{n}_e \sim 0.05$, $\Delta T_e / T_e \sim 0.2$.电子温度 $T(r, t)$,环电压 $V(t)$ 等的等离子体参数弛豫 20—30 ms 后,达到一个新的稳定态,并和杂质注入之前状态非常接近.观察到 $m = 2$ MHD 活动或硬 x 射线信号(能量超过 3 MeV 的硬 x 射线 HXR 信号)没有较大变化.当注入较多 Al 杂质后,等离子体的行为可分 3 个阶段,由图 2 中垂直线显示.

在阶段 I - 杂质进入和等离子体热能开始损失, Al 等离子体形成. Al 等离子体的电离后, Al 离子与

电子在环向沉积,至少需花费 2—3 ms.然后,电子的密度将产生环向和极向的积累,其持续时间可以从测量电子密度的干涉仪的 \bar{n}_e 信号的上升与饱和的时间来估算(看图 2(c)密度的波形).在这过程,等离子体的水平位移 (Pos_H) 以常数速率移动 2 cm 表明热能损失和电流衰减的开始.在 2 ms 时间内电流衰减 20 kA,并且在环电压 (V_t) 上观察负到尖峰(持续 0.3 ms).环向场和极向场的磁场扰动开始增长,但增长的幅度中等.总辐射功率 P_r 显著增加(看图 2(d)辐射强度测量仪 Barometer 测量的信号 P_r),热能损失发生.然后,由于杂质沉积导致电子温度明显下降 ($\Delta T_e / T_e \sim 0.5$).此损失也由等离子体位移所给出的平衡分析中得到的等离子体 β 值的减少所证实.等离子体压强与中性粒子产生率同时减少,表明在 Al 杂质注入后的这个冷的高密度的等离子体放电中,电子和离子的热能在同一时间内损失.此阶段以放电中出现小破裂而结束.这阶段在 2—25 ms 时间范围内变化,持续时间随激光功率、金属膜的厚度和等离子体密度的减少而增加.

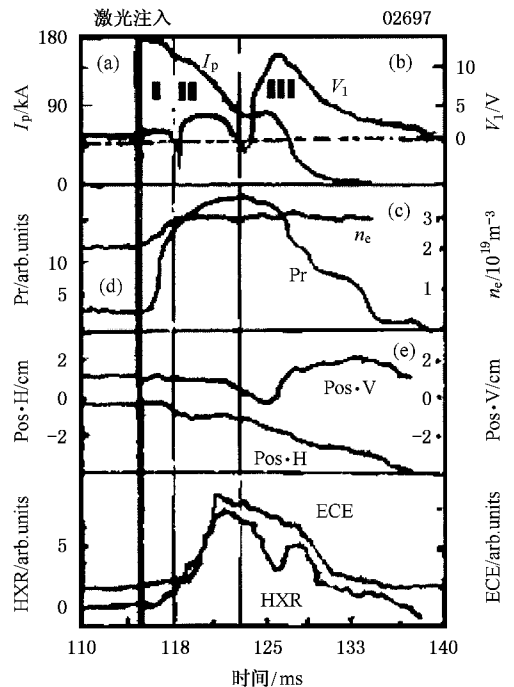


图 2 杂质注入后等离子体的行为

在阶段 II - 等离子体电流 (I_p) 以衰减率 ~ 30 kA/ms 开始衰减,等离子体温度下降.环电压 (V_t) 变成正值并且显著增加,欧姆加热功率增加,然后环电压趋于饱和.同时,我们还观察到电子能量 W_e 明

显损失,在装置 No. 02697 的放电中测量得到 $\Delta W_e/W_e$ 的最大值为 0.85. 由于等离子体被冷却,等离子体垂直位移的控制被自行关闭,垂直位移(Pos_H)基本上不改变,而水平位移(Pos_V)往里,又观察到非热电子回旋辐射(ECE)强烈突起. 磁场扰动开始增长,从图 3 中可看到环电压破裂之前瞬间,由 MHD 傅里叶分析器测量到 $m = 2$ ($q = 2$) 模值的增长,并且硬 x 射线的强度稳定地增加. 这些增加预示在电流衰减的初始期间高能电子逐渐建立,电子温度却达到较小值.

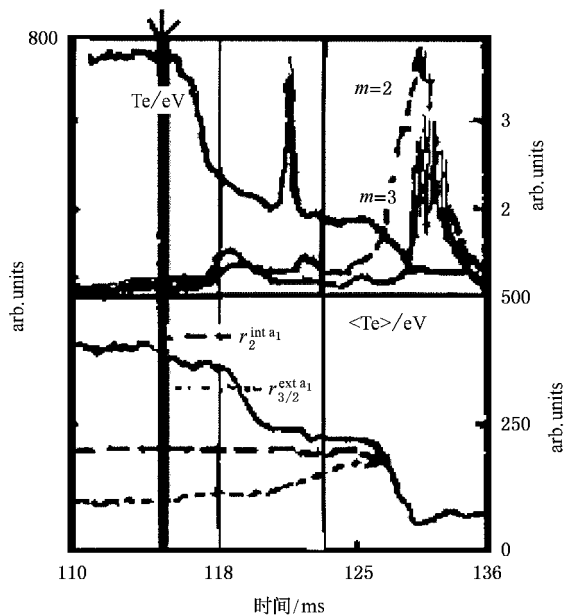


图 3 杂质注入后电子温度和 MHD 的行为及 $q = 2$ 与 $q = 3/2$ 磁岛交叠

在阶段 III-电流衰减完成,非热电流明显出现,并且增长到约 20 kA,叠加在原有剩下的衰减电流上,环电压向负向延续.从图 3 中可看到破裂之前瞬间由 MHD 傅里叶分析器测量到 $m = 2$ ($q = 2$) 和 $m = 3$ ($q = 3$) 的模值有很大增长, $q = 2$ 与 $q = 3/2$ 磁岛交叠. 等离子体垂直位移又回到真空室的中心,等离子体电流又以衰减率 ~ 20 kA/ms 向下衰减,放电将终止在内壁.破裂以后电子能量不能恢复.

在杂质注入后连续的两个阶段中软 x 射线辐射行为如图 4 三维时空分布所示.在杂质注入后,立即在小半径中间处建立突起的软 x 射线辐射分布,而在芯区的辐射尚未增长,在 $q = 1$ 的中心区没有发生锯齿崩塌现象.仅仅花费 2—3 ms 时间,该辐射分布立即在中心峰化,接着就是一个维持约 0.2 ms 的尖峰辐射.在破裂之前,软 x 射线辐射的峰化分布与

破裂瞬间的尖峰信号和杂质原子的快速的流动是一致.

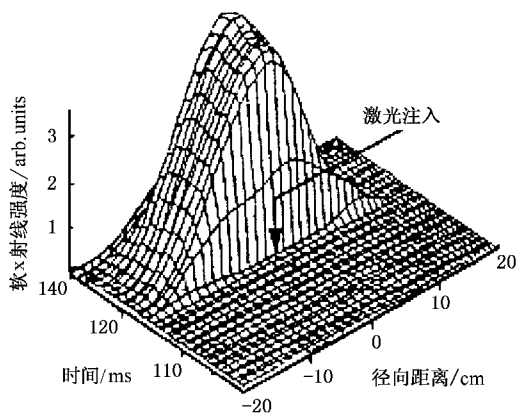


图 4 软 x 射线强度的三维分布

3. 讨 论

实验证明了破裂发生之前有可能使等离子体快速(约 3 ms)冷却和 85% 电子能量损失.用欧姆损耗对已知的输入功率的关系式计算获得在电流衰减前的等离子体电阻,如果该电阻是 Spitzer 电阻,取 $Z_{eff} = 4$,在电流衰减前 2 ms 期间 HL-1M 中参考电子温度是 ~ 10 eV.被破裂之前的反常热导得到的最低温度是小于 30 eV.破裂时刻电子温度 T_e 下降不仅因沿小半径的运输的增强,也可能是热传导被辐射冷却造成的缘故.在破裂之前,杂质原子流束冷却了正处于电离的等离子体,并且保持低温状态.热能与磁能两者似乎都被辐射引起很大的损耗.电子温度下降可以用简单的码模拟证实^[5].通过用高时间分辨(~ 0.2 ms)XYZ 的平衡重建码^[5],可得到阶段 II 等离子体平衡计算.该计算表明,在电流衰减的初始阶段热能损失过程与磁能损失的初始段,等离子体一直保持很好平衡.热能与等离子体电流损失期间,等离子体的径向位移向里,而垂直位移基本不变.

图 2 中显示电流衰减期间的电流坪具有 HL-1M 在低密度放电中发生的快破裂的标准特征.此坪是由逃逸电子携带的电流形成,逃逸电子产生的数量可作为电子温度的标志.逃逸电子产生率的计算给出 Dreicer 电场 E_D .在破裂放电中,电子温度的下降时,可观察到大的电场和非热电流的增长.用 Paral-Pogutse 的近似法模拟并考虑雪崩效应^[6]指出:因电子温度 T_e 的下降,在放电小破裂发生时,产生逃逸

电子.图3显示了硬 x 射线辐射强度的信号和等离子体电流之间时间上的关联.采用精密的振动测量仪(精度 0.1 mm)在真空室的顶部和底部及赤道平面各个位置测量真空室大半径的径向位移表明:激光吹气注入高 Z 杂质导致电流终止而引起真空室的整体径向位移是小幅度的,而且有较好的环向对称性.虽然真空室具有波纹段,由于环向受力较对称,对整体位移的影响较小.说明用此方法使放电电流终止对装置本身的冲击很小,图5给出破裂瞬间

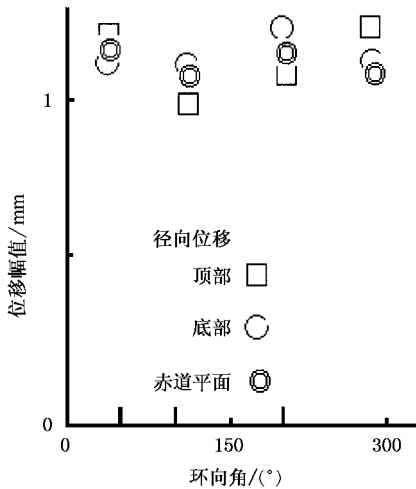


图5 真空室大半径的径向位移 (mm)

的真空室的大半径径向位移的测量,零度角起始点为1号环向场线圈的中心.

若辅以由MHD傅里叶分析器制作的破裂报警器,即可作为一种避免或软化能量突然衰竭与电流突然衰竭,并且控制预计的放电破裂或突然终止放电的重要措施.

4. 结 论

(1)激光吹气把高 Z 杂质注入在 HL-1M 装置欧姆加热的等离子体中的实验已经证明了破裂发生之前有可能使等离子体快速(约 3 ms)冷却,等离子体电子能量损失 80%.

(2)选择大量杂质注入的目的首先是为了能穿透到高温的等离子体芯区,第二个目的是产生一个大的电子密度扰动,此扰动既提供强辐射源,又可以立即使本底电子温度下降到 0.1 keV 以下.

(3)实验结果表明在热能衰竭之前高辐射阻性等离子体形成,它可消耗热能和磁能,并且减小了局部区域破裂的危险.在小破裂期间逃逸电子的产生是因为在杂质注入之前装置就有大 Dreicer 参数 $E/E_D \sim 0.0025$,但可以用增加电子密度方法减小此参数.

[1] Wesson J A *et al* 1991 *Nucl. Fusion* **31** 641
 [2] Yamazaki K and Schmidt G L 1999 *Nucl. Fusion* **39** 845
 [3] Kuteev B V, Sergeev V Yu and Sudothe S 1995 *Nucl. Fusion* **35** 397
 [4] Luo C X *et al* 1997 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **15**(4) 37
 (in Chinese) 骆翠贤等 1997 核聚变与等离子体物理 **15**(4)

37]
 [5] Zheng Y Z *et al* 2002 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **22**(2) 17
 (in Chinese) 郑永真等 2002 核聚变与等离子体物理 **22**(2) 17]
 [6] Jayakumar R 1993 *Phys. Lett. A* **172** 447

Potential safe termination by laser ablation of high- Z impurity in the HL-1M tokamak

Zheng Yong-Zhen[†] Feng Xing-Ya Zheng Yeng-Ja Guo Gan-Cheng Xu De-Ming Deng Zhong-Chao

(*Southwestern Institute of Physics , Chengdu 610041 , China*)

(Received 13 July 2004 ; revised manuscript received 13 September 2004)

Abstract

A preliminary experiment for triggering a plasma current quench by means of injection of high- Z impurities has been performed on the HL-1M before the major disruption. Using injection of impurity with higher charge of the nuclei allows us to increase the radiation cooling on a 3 ms time scale and the electronic temperature loss contract is 80% before current terminates. It can be a simple and potential approach to decrease significantly the plasma thermal energy and the magnetic field energy before a disruption and to a safe plasma termination.

Keywords : high- Z impurities , disruption , safe plasma termination , laser ablation

PACC : 5270 , 5255P

[†]E-mail : yz.zheng@swip.ac.cn