

HL-2A 托卡马克上的边缘局域模特性初步研究*

刘春华[†] 聂林 黄渊 季小全 余德良 刘仪 冯震 姚可 崔正英
严龙文 丁玄同 董家齐 段旭如

(核工业西南物理研究院聚变科学所, 成都 610041)

(2012 年 1 月 21 日收到; 2012 年 5 月 3 日收到修改稿)

高约束模式(H模)下自发产生的边缘局域模(ELM),虽然利于控制等离子体密度和排出杂质粒子从而实现H模放电的稳态运行,但是ELM爆发携带的大量粒子和能量会对装置的第一壁材料造成很大的损坏,所以在下一代聚变装置上使用之前很多装置已经开始了对ELM的研究.在HL-2A装置上观察到了不同的ELM,扰动幅度小的ELM引起的等离子体储能损失小于3%,ELM之间的时间间隔约为3ms,表现出III型ELM的特征;扰动幅度较大的ELM的爆发对等离子体电流、等离子体密度及储能都有很明显的扰动,对等离子体储能的扰动大于10%,ELM爆发的频率随通过等离子体磁分界面的净加热功率的增加而增加,表现出明显的I型ELM的特征.ELM先兆有不对称性,在弱场侧磁探针信号能观测到,但强场侧却观测不到;ELM先兆的频率约为45kHz,观测到的最长的先兆先于ELM前约10ms出现.

关键词: HL-2A 托卡马克, 高约束模, 边缘局域模, 弹丸注入

PACS: 52.55.Tn, 52.35.Py, 52.70.Kz

1 引言

要实现磁约束核聚变能的商业利用,需要不断改善等离子体约束,达到自持燃烧条件,并在高参数下稳态运行.1981年,在德国ASDEX装置上获得了高约束(H)模约束的实验结果^[1].等离子体放电从低约束(L)模转换为H模,加热功率需大于触发L-H模转换的功率阈值^[2].在从L模转换到H模的放电过程中,等离子体边缘区的反常输运被抑制,在磁分界面内侧形成边缘输运垒(ETB),边缘等离子体参数(如密度、温度)空间分布的梯度增大,从而形成等离子体台基(pedestal).台基区大的等离子体压强梯度(p'_{ped})以及它产生的自举电流(J_{ped}),为表面模或气球模的不稳定性增长提供能量,这些磁流体力学(MHD)扰动就激发了边缘局域模(ELM),使边缘等离子体的压强梯度不能超过一个极限值.该实验现象可以用边缘等离子

体电流密度及压强梯度驱动的表面气球模不稳定性模型(coupled peeling-ballooning modes)^[3]成功地解释,这种表面气球模具有中等大小的环向模数($3 < n < 40$).由于ELM限制了台基等离子体的压强高度,也就制约了主等离子体约束性能的提高.但从稳态运行的角度分析,由于ELM不断排出杂质,在较好的控制下,ELM-H模放电可以长期维持^[4].一般地,无ELM-H模放电时粒子约束的改善必然使杂质粒子的约束也得到改善,造成杂质在中心区域的积累,杂质辐射损失加大,最终使H模终止.2002年,在DIII-D装置上实现了一种具有边缘谐波震荡(EHO)的无ELM-H模放电^[5],由于EHO具有排出杂质和控制等离子体密度的功能,这种H模放电也可以长期、准稳态地维持,因此称为QH模,在未来的国际热核试验堆(ITER)装置上有重要的应用前景.

ITER装置的H模放电运行主要参数^[6]是:等离子体电流 $I_p = 15$ MA,环向磁场 $B_{TF} = 5.3$ T,高

* 国家自然科学基金(批准号:10990213)资助的课题.

[†] E-mail: liuchunhua@swip.ac.cn

密度 $n_e \geq 0.85 n_{GW}$, 达到的聚变增益因子 $Q_{DT} = 10$. 根据现阶段托卡马克装置上得到的 I 型 ELM 能量的定标律, ITER 装置上这种 H 模放电运行产生的 I 型 ELM 能量将达到 20 MJ 以上, 而偏滤器靶板和第一壁材料只能承受 1 MJ 以下的 ELM 产生的热负荷^[7,8]. 必须将 ITER 的 I 型 ELM 能量降低 20 倍以上, 否则将严重影响偏滤器靶板部件的使用寿命, 而且也会腐蚀主真空室第一壁材料, 以至于 ITER 的运行条件和目标^[9] 很难实现. 为了解决此问题, 提出了两种缓解或控制 I 型 ELM 能量损失的技术方案. 一种方案是在边缘等离子体中产生某种周期性的或连续的强度适当的扰动, 使等离子体损失能量和粒子, 同时也控制了边缘等离子体的 MHD 稳定条件从而不产生 ELM, 实现无 ELM 的稳态 H 模放电. 另一种方案是利用弹丸注入缓解 ELM 的技术. 已经在 ASDEX-U, DIII-D, JT-60U 和 JET 等装置上, 对 I 型 ELM 能量的时间空间分布性质和缓解技术进行了深入广泛的研究. 在 DIII-D 装置上, 用安装在真空室内部的电流线圈 (I-线圈) 产生 $n = 3$ 的上、下不对称分布的共振磁场扰动 (RMP)^[10], 在等离子体台基区形成一系列沿极向分布 ($m = 9-14$) 的磁岛, 只要在 q_{95} 磁面上满足共振条件, ELM 被外加的 RMP 完全抑制而且台基压强没有明显变化. 弹丸注入主动缓解技术是向 ETB 区注入冰冻的小弹丸或定向超声气体分子束流 (SMB), 引起台基内等离子体参数的变化, 使 I 型 ELM 的先兆振荡在较低的水平上被激发. 每个小弹丸触发一个 I 型 ELM, 即弹丸注入同步调制 ELM 频率^[11,12]. 提高弹丸的注入频率, 就能提高 ELM 崩塌的重复频率从而减小每个 ELM 引起的能量损失量, 因为每个 ELM 的能量损失与重复频率成反比, 从而使 I 型 ELM 得到缓解. 目前还不能确定弹丸注入位置对触发 ELM 的影响, 也不清楚对弹丸参数如尺寸、速度的具体要求. 对这种弹丸注入缓解 ELM 的要求是, 不产生明显的加料效果而影响边界密度, 小尺寸、慢速、高重复频率地发射弹丸, 能够预言适用于 ITER 运行要求的弹丸注入同步调制 ELM 频率的技术要求, 研究切向弹丸注入系统、提高局部扰动量等. 对于弹丸触发 ELM 的物理机制及可靠性, 以及 I 型 ELM, III 型 ELM 的产生条件等, 仍然是国际上的研究热点. 在目前的大中型托卡马克装置上, 如 ASDEX-U, D III-D 或 JET, 虽然对这两种技术方案的研究得到一些实验结果, 但

推广应用于燃烧等离子体条件的有效性仍有待于深入研究, 对有关的物理机制方面的认识也不完全清楚. 在继续研究和发展新的 I 型 ELM 缓解技术手段的同时, 也必须探索新的 H 模方案, 它没有 ELM 或只有比较小的 ELM, 却有和 I 型 ELM-H 模相当的约束改善因子及杂质排出能力, 在 ITER 运行条件下具有满足设计要求的聚变增益因子 ($Q_{DT} = 10$)^[6].

HL-2A 装置实现 H 模放电以后为开展在 H 模放电下的物理研究, 如 pedestal 不稳定性、L-H 转换的条件和触发机制以及 ELM 的缓解与控制等, 提供了一个切实可行的实验平台, 也能为 ITER 的稳定可靠运行中可能存在的 key 问题开展必要的研究工作. 本文主要介绍目前 HL-2A 装置上出现的 ELM 的特征.

2 HL-2A 装置上的 H 模放电

HL-2A 托卡马克装置^[13] 的大半径 $R = 1.65$ m, 小半径 $a = 0.40$ m, 环向磁场达到 $B_T = 2.7$ T, 等离子体电流达到 $I_p = 450$ kA, 放电持续时间 6 s 以上. 2004 年首次在中国实现了偏滤器位形放电, 并于 2009 年春季物理实验中首次在中国实现了偏滤器位形下的具有 ELM 的 H 模放电运行^[14].

由于欧姆加热效率随着等离子体温度的升高而降低, 必须使用辅助加热手段使等离子体离子温度达到 10 keV 以上, 从而使 D-T 核聚变反应的概率最大^[15]. 这就要求等离子体具有较高的约束性能, 即 H 模约束. 在理想条件下, 发生 L-H 转换需要一定的加热功率:

$$P_{th}(\text{MW}) = 0.042 n_e^{0.73} (10^{20} \text{ m}^{-3}) \times B_T^{0.74} (\text{T}) S^{0.98} (\text{m}^2), \quad (1)$$

这里 n_e 是以 10^{20} m^{-3} 为单位的等离子体密度, B_T 是真空室几何中心的环向磁场强度, S 为主等离子体磁分界面的表面积. HL-2A 等离子体的表面积约为 24.7 m^2 . 由于电子回旋共振加热采用基频波 (O-mode) 或二次谐波 (X2-mode) 方式, 适用的纵场强度分别为 B_T 约 2.43 T 或 B_T 约 1.3 T, 对应的 L-H 转换时等离子体电子密度的典型值分别为 $n_e = 0.3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 或 $n_e = 0.15 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$. 在这两种放电条件下, 按 (1) 式计算的发生 L-H 转换所需要的加热功率阈值分别为 0.78 和 0.28 MW. 实

实际上, L-H 转换需要的加热功率受到其他一些因素的影响, 如真空室器壁条件、磁场位形以及等离子体 H^+/D^+ 的同位素效应等. 为了降低 HL-2A 装置上获得 H 模放电所需的加热功率, 使用 D_2 作为工作气体, 下偏滤器磁场位形且离子磁梯度漂移方向指向偏滤器的零点, 器壁的辉光放电清洗和硅化, 等离子体放电控制的优化等. HL-2A 装置目前有 3 MW 的电子回旋加热 (ECRH, 微波频率为 68 GHz)^[16], 1 MW 的低混杂波电流驱动系统 (LHCD, 微波频率为 2.45 GHz) 以及 1 MW 的中性束注入加热系统^[17], 功率为 2 MW、微波频率为 140 GHz 的一套 ECRH 系统正在安装调试中. 对加料系统也进行了改进和完善, 形成常规条件下的本底送气和补充送气, 强场侧 (HFS) 和弱场侧 (LFS) 的超声分子束加料 (SMBI)^[18,19], 以及弹丸加料系统 (PI)^[20]. 该系统采用挤压切割技术, 可以按 1—30 Hz 的重复频率顺次注入最多可达 40 个弹丸, 弹丸直径为 1.3 mm, 长度在 1.3—1.7 mm 之间可调, 弹丸速度在 150—1000 m/s 之间根据不同实验需要进行调节.

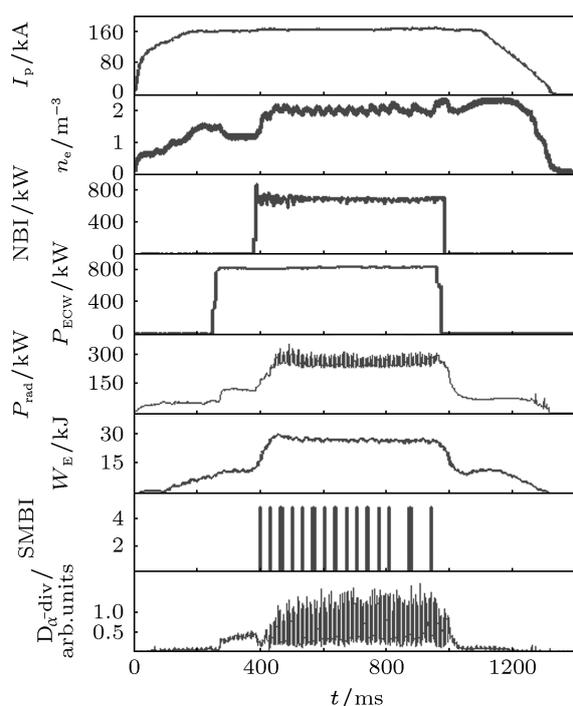


图 1 具有 ELM-H 模特征的第 11617 次等离子体放电波形

图 1 给出了第 11617 次在 NBI 和 ECRH 协同作用下的 H 模放电主要参数. 从上往下分别为等离子体电流 I_p , 中心弦平均电子密度 n_e , NBI 加热功率和 ECRH 加热功率, 主等离子体总辐射损失 P_{rad} ,

等离子体储能 W_E , 分子束系统电磁阀的开关控制信号, 偏滤器室的 $D_{\alpha-div}$ 辐射信号. $D_{\alpha-div}$ 辐射信号用于监测 ELM 现象, 以及在时间尺度上对 $D_{\alpha-div}$ 信号的放大从而能够比较 ELM 的大小和 ELM 之间的时间间隔. 第 11617 次放电的主要参数为: 环向磁场 B_T 约 1.3 T, 等离子体电流 I_p 约 165 kA, 电子回旋功率 $P_{ECRH} = 850$ kW 在 260 ms 时刻注入, 中性束功率 $P_{NBI} = 680$ kW 在 385 ms 时刻注入后, 随即发生 L-H 转换, 等离子体储能 W_E 在 ECRH 注入之后没有明显的增加, 但在 NBI 注入之后由 10.5 kJ 增加到 H 模期间的 26.6 kJ, 主等离子体室的辐射功率 P_{rad} 在 H 模期间也明显增强; H 模约束态的持续时间达到 550 ms 左右, 约束改善因子 $H_{89} > 1.5$.

3 ELM 特征及 ELM 对等离子体的扰动

在图 1 所示的 H 模放电 ELM 之间的时间间隔呈现准周期重复出现的特征^[21]. ELM 时间间隔在 1—3 ms 之间, 对等离子体的扰动较小, 每个 ELM 引起的等离子体储能损失小于 3%, 因此属于第 III 类型的 ELM. ELM 类型及其频率 (f_{ELM}) 与通过等离子体磁分界面的净加热功率 P_{net} 有关^[22],

$$P_{net} = P_{aux} + P_{Ohm} - P_{rad} - dW_E/dt, \quad (2)$$

这里 P_{aux} 为辅助加热功率, P_{Ohm} 为欧姆加热功率, P_{rad} 为主等离子体的辐射总功率, W_E 为等离子体储能. I 型 ELM 的频率 f_{ELM-I} 随 P_{net} 的增加而增加, 但 III 型 ELM 的频率 $f_{ELM-III}$ 随 P_{net} 的增加而减小. 在实验上可以用提高加热功率的方法判断, 即 $f_{ELM-III}$ 随加热功率的提高而降低, f_{ELM-I} 随着加热功率的提高而增加. III 型 ELM 和 I 型 ELM 都属于边缘区域的一种磁流体不稳定性, 第 III 类型 ELM 可以用气球模 (ballooning mode) 来解释, I 型 ELM 可以用表面气球模 (peeling-ballooning mode) 来解释^[23,24]. 虽然目前 HL-2A 装置缺乏等离子体边缘区域相应的测量手段来判断磁流体不稳定性模型的类型, 但是可以通过 ELM 频率随净的加热功率的变化以及 ELM 爆发导致等离子体储能损失进行判断.

在图 2 所示的 16125 次放电过程中, NBI 系统和 ECRH 的四个回旋管先工作 (总的注入功率为 1.08 MW) 触发 L-H 转换后, 在 H 模约束的等离子体放电期间再让第五个回旋管工作 (总的注入功

率为 1.24 MW), 使总加热功率有一个台阶式的上升, 等离子体储能也有所增加. 图 3 给出了 ELM 幅值及 ELM 时间间隔分析结果. 图 3 中从上到下依次是偏滤器室氦 α 辐射监测到的 ELM 信号和 ELM 时间间隔计算结果. 从图 3 中可以看出, 在总加热功率为 1.08 MW 时, ELM 的平均时间间隔小于 1 ms, ELM 的平均幅值约为 0.3; 当功率升高到 1.24 MW 时, ELM 的平均时间间隔约为 3 ms, ELM 的幅值约为 0.6, 说明该次 H 模放电伴生的 ELM 属于第 III 类型.

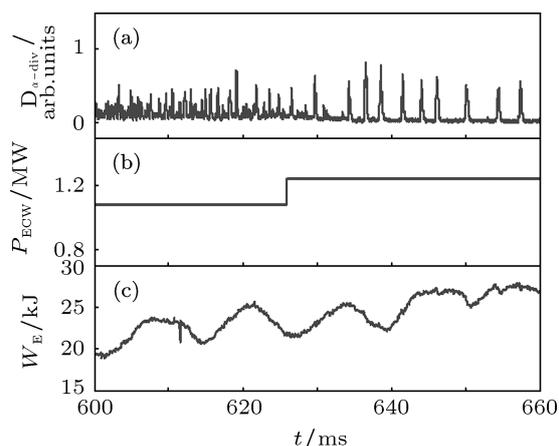


图 2 16125 次放电的 H 模期间, ELM 频率和等离子体储能随加热功率的变化情况 (a) D_{α} 信号; (b) 辅助加热功率; (c) 等离子体储能

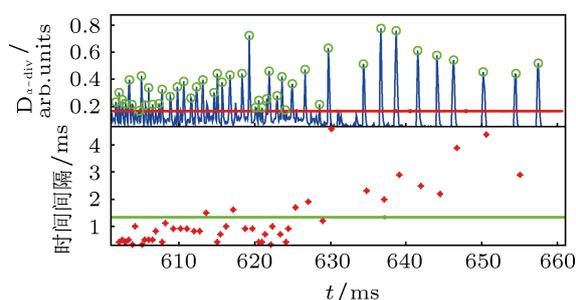


图 3 ELM 幅值及 ELM 时间间隔分析结果 上图是偏滤器室 D_{α} 的 ELM 辐射信号 (绿色圆圈标记出了辐射强度的相对大小, 红线标记出了选取出 ELM 时基准辐射强度值); 下图是 ELM 时间间隔 (红色符号标记出了每相邻两个 ELM 的时间间隔, 绿色直线表示出了所取时间段内 ELM 时间的平均值)

另外, 也观察到频率低于 50 Hz、导致能量损失大于 10% 的较大的 ELM, 表现出第 I 类型的 ELM 的行为特征. 大 ELM 对等离子体有较大的扰动, 如图 4 所示的 13723 次放电. 图 4 从上往下依次是 $D_{\alpha-div}$ 辐射信号、等离子体储能、等离子体电流、中心等离子体线平均密度、归一化半径为 0.6 处的等离子体弦平均密度、归一化半径

为 0.8 处的电子温度. 可以看出 ELM 对等离子体电流、中心弦平均电子密度、边缘区电子密度和电子温度的扰动明显, 造成的等离子体储能损失也非常大. 图 5 给出了 11617 次放电和 13723 次放电大 ELM 和小 ELM 对等离子体的储能扰动的比较. 11617 次放电的参数如图 1 所示. 13723 次放电的主要参数是: 环向磁场 B_T 约 1.3 T, 等离子体电流 I_p 约 175 kA, 电子回旋功率 $P_{ECRH} = 1150$ kW, 中性束功率 $P_{NBI} = 450$ kW. 从图 5(b) 中可以看出, 大 ELM 爆发造成的等离子体储能损失大于 10%, 图 5(a) 中给出了小 ELM 对等离子体储能造成的损失情况, 可以看出小 ELM 爆发对等离子体储能几乎没有影响.

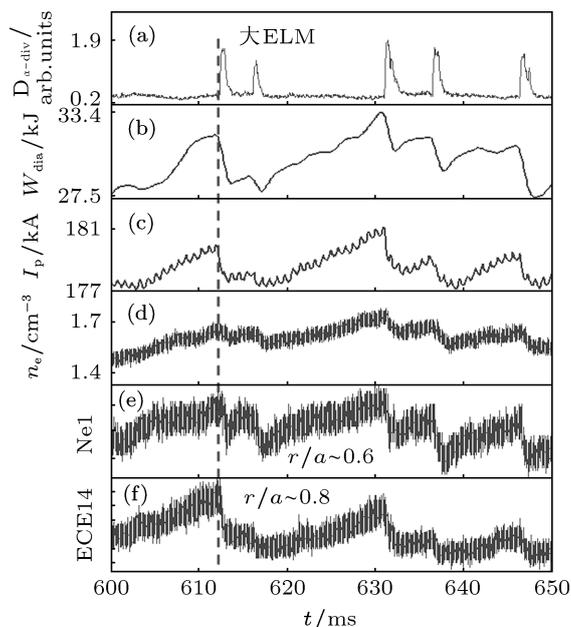


图 4 大 ELM 对等离子体主要参数的扰动情况 (a) 偏滤器室的 D_{α} 信号; (b) 等离子体储能; (c) 等离子体电流; (d) 中心等离子体线平均密度; (e) 归一化半径为 0.6 处的等离子体弦平均密度; (f) 归一化半径为 0.8 处的电子温度

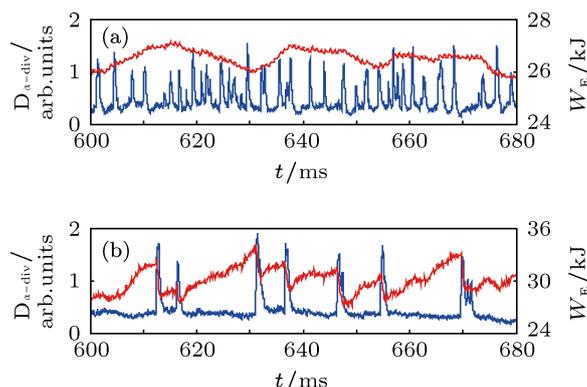


图 5 大 ELM 和小 ELM 对等离子体储能的扰动比较 (a) 小 ELM 对等离子体的扰动不明显; (b) 大 ELM 对等离子体储能的扰动非常明显, ELM 的爆发导致储能的损失大于 10%

在产生 I 型 ELM 之前,台基区出现 MHD 先兆振荡,导致 ETB 破裂,限制了台基等离子体压强梯度的临界值,这些现象可以用表面气球模型解释.但缓慢增长的先兆振荡是如何导致 ETB 破裂的,还没有适当的理论模型能给出合理的解释. Mirnov 探针是研究 ELM 的磁先兆扰动 [25] 的重要诊断手段之一,在 HL-2A 装置上 Mirnov 探针测量信号的数据采集频率为 1 MHz,极向和环向模数分辨率较高 ($m < 14, n < 10$),使用小波变换作为主要的数据分析方法.小波变换适合分析非平稳或瞬变信号,在高温等离子体物理实验研究中已经获得广泛的应用,如用于分析湍动粒子输运 [26,27]、ELM 演化过程 [28] 或 MHD 振荡 [29] 等.本工作中使用的小波是复 Morlet 小波函数

$$\psi(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\pi F_b}} \exp(i2\pi F_c \tau) \exp\left(-\frac{\tau^2}{F_b}\right), \quad (3)$$

式中 F_c 是中心频率, F_b 是 $\psi(\tau)$ 的带宽.对其伸缩和平移后的小波为

$$\psi_{m,s}(\tau) = \psi[(\tau - m)/s]/\sqrt{s}, \quad (4)$$

这里 m 称为平移参数, s 称为尺度参数.对数据采集时间间隔为 δt 的离散信号 x_j ,其连续小波变换系数为

$$W_m(s) = \sum_{j=1}^N x_n \psi^* \left(\frac{j - m}{s} \delta t \right). \quad (5)$$

如图 6 所示为 14011 次放电,图中信号从上往下依次是 $D_{\alpha\text{-div}}$ 辐射信号、位于中平面内的强场侧磁探针信号 (MP04)、位于中平面内的弱场侧磁探针信号 (MP13)、使用 Morlet 小波对弱场侧磁探针信号的频谱分析结果. H_{α}/D_{α} 测量信号强度未经过绝对标定,为任意单位,磁探针信号 MP04, MP13 等的单位为 T/s. ELM 观察到的磁先兆扰动具有气球模特征,主要特征是环向模数 $n > 4$,强弱场具有强不对称,这种不对称在 PM13 和 PM4 的测量信号上明显地表现出来.从图 6 可以看出,弱场侧能观测到 ELM 先兆,但强场侧却观测不到.这类磁先兆经常在 ELM 崩塌前 0.3—2 ms 激发,频率约为 45 kHz,沿电子逆磁漂移方向.在 ELM 崩塌前约为 1 ms,该先兆扰动 (PM13 测量信号) 开始出现,0.5 ms 时幅度明显增长,频率下降.先兆扰动的持续时间也有可能较长,如图 7 所示的 13723 次放电,从上往下信号依次是偏滤器的 D_{α} 辐射信号、磁探针 MP13 的信号、ELM 先兆的傅里叶频谱分析结果.从图 6 可以看出 ELM 崩塌前的先兆扰动持

续约为 10 ms,频率约为 45 kHz.通过对图 6(d) 和图 7(c) 的比较可以发现,小波变换在低频部分的频率分辨率较高,但对应的时间分辨率却比较低.

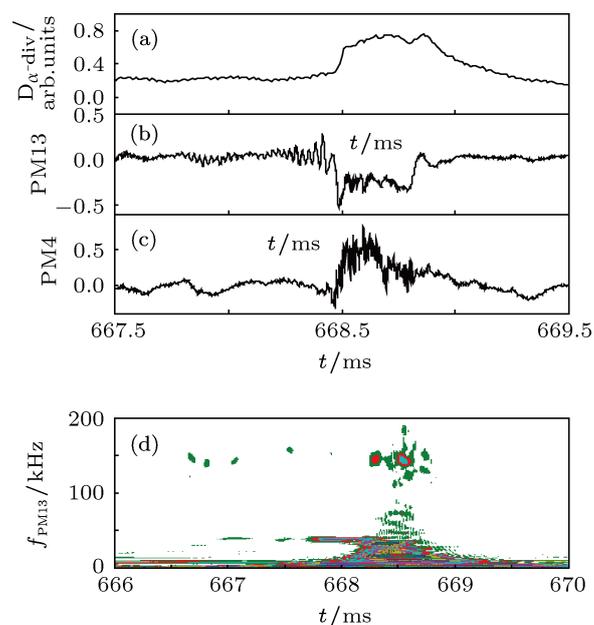


图 6 第 14011 次放电的 H 模期间,磁先兆的扰动情况 (a) 偏滤器室 D_{α} 信号,可用于监测弹丸在等离子体中消融情况; (b) 弱场侧磁信号 MP13; (c) 强场侧磁信号 MP4; (d) 对 MP13 小波分析的结果

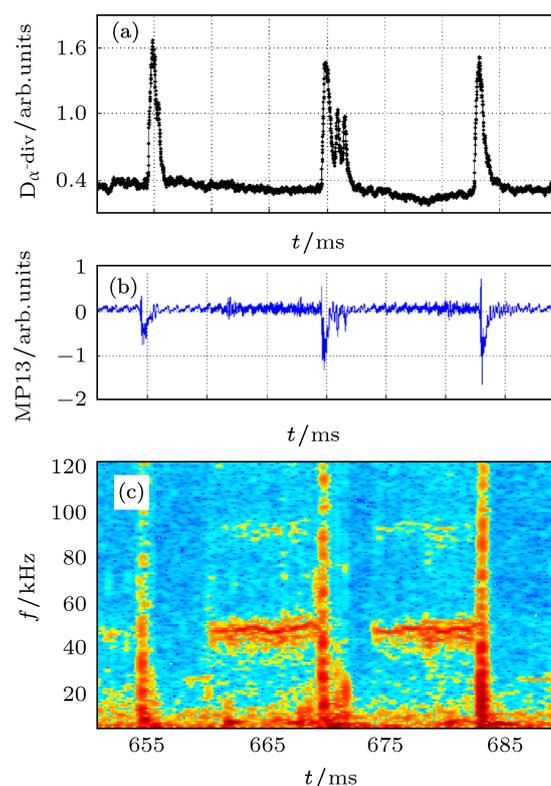


图 7 第 13723 次放电中出现的等离子体先兆模 (a) 偏滤器室的 D_{α} 信号; (b) 弱场侧的磁信号 MP13; (c) 弱场侧的 MP13 进行傅里叶变换的结果

ELM 在刮离区 (SOL) 演化为丝状等离子体 (ELM-filaments) 结构, 它们会携带大量的能量跨越磁力线逃逸出边界层, 对第一壁造成损伤并溅射出杂质, 对 ITER 的安全正常运行构成巨大威胁. 因此研究丝状等离子体的传播特征、产生机制以及控制方法具有重要的意义. 在 HL-2A 装置上, 使用高分辨率的静电探针阵列 (时间分辨为 $1 \mu\text{s}$, 空间分辨为 4 mm) 对磁力线过渡区域湍流特征和丝状等离子体结构的传播特征做了详细测量 [27], 对 ELM 在 SOL 的输运和演化特性也进行了初步研究. 统计得到了丝状等离子体的存在时间大约在 $20\text{--}40 \mu\text{s}$ 量级、极向径向空间尺度为 $0.5\text{--}3.0 \text{ cm}$. 这些结果为深入分析在高约束模式下的丝状等离子体结构特征、能量损失过程、输运机制奠定了重要的基础. 有关的详细结果将在另外的文章中介绍.

4 弹丸注入对 ELM 行为的影响

在 HL-2A 物理实验中, 开展了弹丸注入、常温或低温气体超声束流加料对 ELM 行为影响的研究, 观察到 ELM 频率增加而幅度减小的现象. 同时, 也着手设计并建设线圈系统, 即将开展这种主动地在边缘等离子体中产生共振磁场扰动, 从而控制或抑制 ELM 崩塌的实验研究. 这里介绍弹丸注入诱发 ELM 不稳定的实验结果. 这种弹丸注入实验的主要放电参数为: $B_T = 2.38 \text{ T}$, O-模电子回旋加热; 弹丸尺寸设置为最小值 ($\phi 1.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$), 避免等离子体密度的大幅度上升, 防止等离子体对电子回旋波的反射; 弹丸速度调到最小值 (约 200 m/s), 多发弹丸之间的时间间隔为 50 ms . 图 8 为第 15596 炮等离子体放电的 ELM-H 模期间, 在 701.4 ms 时弹丸注入诱发的磁扰动及 ELM 崩塌. 图 8(a) 中 $\text{TD}_{\alpha 9}$ 代表切向 $46 \text{ D}_{\alpha}/\text{H}_{\alpha}$ 测量阵列第 9 通道的信号, 在 700.8 ms 产生的自发 ELM 对该信号没有影响, 但能够灵敏可靠地探测弹丸消融产生的 D_{α} 辐射. Mirnov 探针信号 PM13 或 PM4 显示这种自发 ELM 的磁扰动持续时间约为 0.2 ms . $\text{TD}_{\alpha 9}$ 探测到弹丸在 701.4 ms 时穿越磁分界面 (LCFS), PM13 和 PM4 都在 701.6 ms 时探测到与自发 ELM 幅度相当的磁扰动信号, 即弹丸注入触发了一个 ELM, 此时弹丸在 LCFS 内约为 4 cm . 通常弹丸注入触发 ELM 与自发 ELM 的磁扰动持续时间是可比的 [30], 但由于目前弹丸注入系统是为加料而设

计的, 弹丸尺寸较大, 弹丸消融继续产生 MHD 扰动, 总的扰动时间达到 0.5 ms 左右. 图 8(b) 表示切向 $\text{D}_{\alpha}/\text{H}_{\alpha}$ 阵列信号得到的弹丸消融云的变化, 以及由电流丝 (CF) 方法 [31] 计算得到的磁分界面位置 r_{sep} 约为 39 cm . 箭头虚线是由弹丸消融云推演出的弹丸运动轨迹, 它揭示弹丸大约在 701.4 ms 时穿越 LCFS, 与图 8(a) 中 $\text{TD}_{\alpha 9}$ 的结果一致. 弹丸注入 ELM-H 模等离子体台基区触发 ELM 是控制缓解 ELM (即同步调制 ELM 频率、降低 ELM 能量损失) 的技术基础, 在未来的 ITER 装置上有重要的应用前景, 但对其物理机制的理解还不够清楚 [32]. 由于弹丸与等离子体的相互作用而消融, 当地等离子体的密度升高、温度降低, 密度梯度增加, 改变等离子体台基区的电流密度分布, 从而触发 ELM. 参照国际上同类型装置的测量结果, 台基压强分布的宽度为 $4\text{--}6 \text{ cm}$ 左右 [32]. 所以, 可以认为弹丸在压强台基的上半侧诱发的强烈扰动产生了 ELM 崩塌. 对弹丸诱发磁扰动的环向模数 n 和极向模数 m 的分析, 以及它们随时间的演化情况, 将另文介绍. 要具体确定弹丸在台基区的位置、弹丸质量与速度对触发 ELM 的影响等, 需要对台基结构的高时空分辨测量, 同时也要准确地测量弹丸的运动轨迹, 这是下一步研究工作的重点.

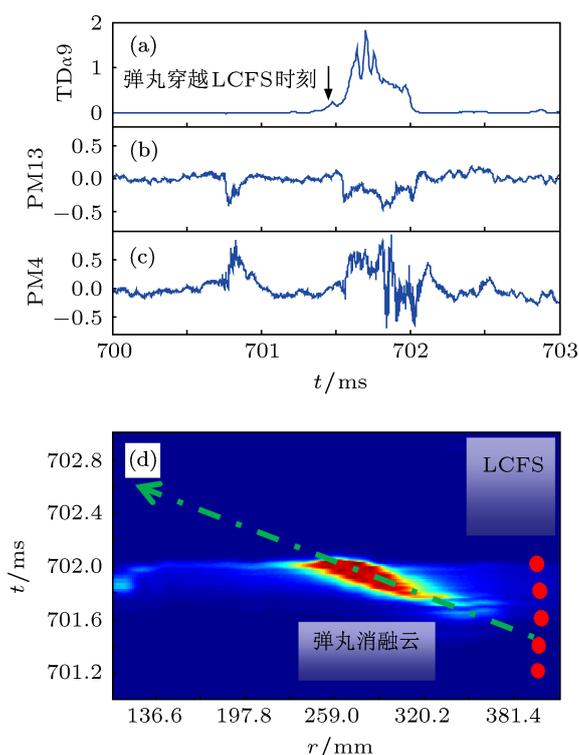


图 8 弹丸注入诱发的磁扰动及 ELM 崩塌

5 结论

HL-2A 装置具有 3 MW 高功率电子回旋加热和 1 MW 中性束注入加热的辅助加热能力, 利用二次谐波 X-模式或基频波 O-模式的 ECRH 与 NBI 的协同加热, 均实现了 H 模放电, 并产生准周期出现的 ELM 崩塌. 这种 ELM 崩塌可以排除杂质, 有利于长期维持的准稳态 H 模放电. 目前 HL-2A 装置上 H 模放电产生的 ELM 多数属于第 III 类型, 引起的等离子体储能损失小于 3%, ELM 之间的时间间隔较短 (约 3 ms 左右); 也有一部分是较大的 ELM, ELM 引起储能损失一般大于 10%, ELM 之间的时间间隔较长 (可以达到 30 ms), 大 ELM 对等离子体其他参数 (如等离子体电流和密度) 也有很强的扰动. ELM 先兆具有气球模特征的强弱场侧不对称

性, 在弱场侧磁探针信号能观测到, 但在强场侧却不容易观测到; ELM 先兆的频率约为 45 kHz, 目前观测到的最长的先兆先于 ELM 前约 10 ms 出现. 开展了弹丸注入对 ELM 影响的实验研究, 观测到弹丸注入到磁分界面以内 4 cm 左右的位置时, 弹丸消融诱发的强烈扰动导致 ELM 崩塌, 此时弹丸位于台基区的上半侧. 分析中忽略了弹丸速度的变化以及弹丸触发扰动的增长时间, 弹丸注入的位置与激发 ELM 崩塌之间的关联性、弹丸消融触发 ELM 的潜在物理机制及其可靠性等, 仍然是没有解决的问题, 是需要 HL-2A 等装置上继续研究的重要课题.

感谢 HL-2A 实验人员对本工作的支持与配合.

- [1] Wagner F, Becker G, Behringer K, Campbell D, Eberhagen A, Engelhardt W, Fussmann G, Gehre O, Gernhardt J, Gierke G V, Haas G, Huang M, Karger F, Keilhacker M, Kluber Q, Kornherr M, Lackner K, Lisitano G, Lister G G, Mayer H M, Meisel D, Millier E R, Murmann H, Niedermeyer H, Poschenrieder W, Rapp H, Bohr H, Schneider F, Siller G, Speth E, Stabler A, Steuer K H, Venus G, Vollmer O, Yu Z 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 1408
- [2] Doyle E J, Houlberg W A, Kamada Y, Mukhovatov V, Osborne T H, Polevoi A, Bateman G, Connor J W, Cordey J G, Fujita T, Garbet X, Hahm T S, Horton L D, Hubbard A E, Imbeaux F, Jenko F, Kinsey J E, Kishimoto Y, Li J, Luce T C, Martin Y, Ossipenko M, Parail V, Peeters A, Rhodes T L, Rice J E, Roach C M, Rozhansky V, Ryter F, Saibene G, Sartori R, Sips A C C, Snipes J A, Sugihara M, Synakowski E J, Takenaga H, Takizuka T, Thomsen K, Wade M R, Wilson H R, ITPA Transport Physics Topical Group, ITPA Confinement Database and Modelling Topical Group, ITPA Pedestal and Edge Topical Group 2007 *Nucl. Fusion* **47** S18
- [3] Snyder P B, Wilson H R, Osborne T H, Leonard A W 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** A131
- [4] Szydowski A, Badziak J, Parys P, Wolowski J, Woryna E, Jungwirth K, Kralikova B, Krasa J, Laska L, Pfeifer M, Rohlena K, Skala J, Ullschmied J, Boody F D, Gammino S, Torrioni L 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** 1399
- [5] Burrell K H, Austin M E, Brennan D P, DeBoo J C, Doyle E J, Gohil P, Greenfield C M, Groebner R J, Lao L L, Luce T C, Makowski M A, McKee G R, Moyer R A, Osborne T H, Porkolab M, Rhodes T L, Rost J C, Schaffer M J, Stallard B W, Strait E J, Wade M R, Wang G, Watkins J G, West W P, Zeng L 2002 *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** A253
- [6] Budny R V, Andre R, Bateman G, Halpern F, Kessel C E, Kritiz A, McCune D 2008 *Nucl. Fusion* **48** 075005
- [7] Janeschitz G, ITER JCT, HTs 2001 *J. Nucl. Mater.* **290–293** 1
- [8] Loarte A, Saibene G, Sartori R, Becoulet M, Horton L, Eich T, Herrmann A, Laux M, Matthews G, Jachmich S, Asakura N, Chankin A, Leonard A, Porter G, Federici G, Shimada M, Sugihara M, Janeschitz G 2003 *J. Nucl. Mater.* **313–316** 962
- [9] Maggi C F, Groebner R J, Oyama N, Sartori R, Horton L D, Sips A C, Suttrop W, ASDEX Upgrade Team, Leonard T, Luce T C, Wade M R, DIII-D Team, Kamada Y, Urano H, JT-60U Team, Andrew Y, Giroud C, Joffrin E, de la Luna E, EFDA-JET Contributors for the Pedestal and Edge Physics and the Steady State Operation Topical Groups of the ITPA 2007 *Nucl. Fusion* **47** 535
- [10] Evans T E, Fenstermacher M E, Moyer R A, Osborne T H, Watkins J G, Gohil P, Joseph I, Schaffer M J, Baylor L R, ecoulet M B, Boedo J A, Burrell K H, de Grassie J S, Finken K H, Jernigan T, Jakubowski M W, Lasnier C J, Lehnen M, Leonard A W, Lonroth J, Nardon E, Parail V, Schmitz O, Unterberg B, West W P 2008 *Nucl. Fusion* **48** 024002
- [11] Baylor L R, Jernigan T C, Combs S K, Houlberg W A, Murakami M, Gohil P, Burrell K H, Greenfield C M, Groebner R J, Hsieh C L, La Haye R J, Parks P B, Staebler G M, Schmidt G L, Ernst D R, Synakowski E J, Porkolab M 2000 *Phys. Plasmas* **7** 1878
- [12] Lang P T, Alonso A, Alper B, Belonohy E, Boboc A, Devaux S, Eich T, Frigione D, Gál K, Garzotti L, Geraud A, Kocsis G, Köchl F, Lackner K, Loarte A, Lomas P J, Maraschek M, Müller H W, Neu R, Neuhauser J, Petravich G, Saibene G, Schweinzer J, Thomsen H, Tsalas M, Wenninger R, Zohm H, JET EFDA Contributors 2011 *Nucl. Fusion* **51** 033010
- [13] Liu Y, Yan J C, Zhou C P, Ding X T, Wang S J, Wang E Y, Yao L H, Mao W C, Pan C H, HL-1M Team, HL-2A Team 2004 *Nucl. Fusion* **44** 372
- [14] Duan X R, Dong J Q, Yan L W, Ding X T, Yang Q W, Rao J, Liu D Q, Xuan W M, Chen L Y, Li X D, Lei G J, Cao J Y, Cao Z, Song X M, Huang Y, Liu Yi, Mao W C, Wang Q M, Cui Z Y, Ji X Q, Li B, Li G S, Li H J, Luo C W, Wang Y Q, Yao L H, Yao L Y, Zhang J H, Zhou J, Zhou Y, Liu Yong, HL-2A Team 2010 *Nucl. Fusion* **50** 095011
- [15] Dong J Q, Yan L W, Duan X R 2007 *Sci. Technol. Rev.* **25** 61 (in

- Chinese) [董家齐, 严龙文, 段旭如 2007 科技导报 **25** 61]
- [16] Rao J, Li B, Zhou J, Yao L Y, Kang Z H, Wang M W, Li L, Feng K, Huang M, Lu Z H, Zhang J S, Li Q, Liu Y 2009 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **29** 324 (in Chinese) [饶军, 李波, 周俊, 姚列英, 康自华, 王明伟, 李立, 冯鲲, 黄梅, 陆志鸿, 张劲松, 李青, 刘永 2009 核聚变与等离子体物理 **29** 324]
- [17] Zou G Q, Lei G J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 082901
- [18] Yao L H, Zhao D W, Feng B B, Chen C Y, Zhou Y, Han X Y, Li Y G, Bucalossi J, Duan X R 2010 *Plasma Sci. Technol.* **12** 529
- [19] Yao L H, Feng B B, Chen C Y, Shi Z B, Yuan B S, Zhou Y, Duan X R, Sun H J, Lu J, Jiao Y M, Ni G Q, Lu H Y, Xiao W W, Li W, Pan Y D, Hong W Y, Ran H, Ding X T, Liu Y 2007 *Nucl. Fusion* **47** 1399
- [20] Zhu G L, Liu D Q, Xu H B, Vinyar I, Lukin A, Wang M J 2011 *Fusion Engineering and Design* **86** 2286
- [21] Huang Y, Nie L, Yu D L, Liu C H, Feng Z, Duan X R 2011 *Chin. Phys. B* **20** 055201
- [22] Zohm H 1996 *Plasma Phys. Control. Fusion* **38** 105
- [23] Huysmans G T A 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** B165
- [24] Suttrop W 2000 *Plasma Phys. Control. Fusion* **42** A1
- [25] Perez C P, Koslowski H R, Hender T C, Smeulders P, Loarte A, Lomas P J, Saibene G, Sartori R, Becoulet M, Eich T, Hastie R J, Huysmans G T A, Jachmich S, Rogister A, Schüller F C, JET EFDA Contributors 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** 61
- [26] Huang Y, Qiu X M, Ding X T, Wang E Y 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 87
- [27] Cheng J, Yan L W, Hong W Y, Zhao K J, Lan T, Qian J, Liu A D, Zhao H L, Liu Yi, Yang Q W, Dong J Q, Duan X R, Y Liu 2010 *Plasma Phys. Control. Fusion* **52** 055003
- [28] Poli F M, Sharapov S E, Chapman S C, JET-EFDA Contributors 2008 *Plasma Phys. Control. Fusion* **50** 095009
- [29] Ma T P, Hu L Q, Chen K Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7209 (in Chinese) [马天鹏, 胡立群, 陈开云 2010 物理学报 **59** 7209]
- [30] Poli F M, Lang P T, Sharapov S E, Alper B, Koslowski H R, JET-EFDA Contributors 2010 *Nucl. Fusion* **50** 025004
- [31] Yuan B S, You T X, Liu L, Li F Z, Yang Q W, Feng B B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2403 (in Chinese) [袁保山, 游天雪, 刘莉, 李芳著, 杨青巍, 冯北滨 2006 物理学报 **55** 2403]
- [32] Kocsis G, Kálvin S, Lang P T, Maraschek M, Neuhauser J, Schneider W, Szepesi T, the ASDEX Upgrade Team 2007 *Nucl. Fusion* **47** 1166

Preliminary behavior studies of edge localized modes on HL-2A*

Liu Chun-Hua[†] Nie Lin Huang Yuan Ji Xiao-Quan Yu De-Liang Liu Yi
Feng Zhen Yao Ke Cui Zheng-Ying Yan Long-Wen
Ding Xuan-Tong Dong Jia-Qi Duan Xu-Ru

(Center for Fusion Science, Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

(Received 21 January 2012; revised manuscript received 3 May 2012)

Abstract

The edge-localized modes (ELMs) are often excited in an H-mode plasma, and they are helpful for cleaning the H-mode plasma to sustain a steady state for a longer time by controlling plasma density and exhausting impurities, but energy and particles carried by ELM burst will badly damage the first-wall of fusion device, thus the characteristics of and the control and mitigation of ELM are studied necessarily prior to the basic operational regime operating on ITER. ELMs of different perturbation amplitudes are observed experimentally on HL-2A tokamak. The frequency of small perturbation amplitude ELM decreases with the increase of net heating power, and it is about 300–400 Hz, and energy loss induced by per ELM is usually less than 3% of the plasma energy. The small ELM is type III ELM. While for large (type-I) ELM, besides that the energy loss induced by an ELM is generally more than 10%, they also exert an obvious perturbation on other plasma parameters, such as plasma current and electron density, and the t_{ELM} may be longer than 30 ms. ELM precursors are poloidally asymmetric, which can be measured by Mirnov probes on the low field side, but not on the high field side; the frequency of ELM precursors is about 45 kHz, and the longest precursors last approximately 10 ms prior to the ELM bursts.

Keywords: HL-2A tokamak, H-mode confinement, edge localized mode, pellet injection

PACS: 52.55.Tn, 52.35.Py, 52.70.Kz

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10990213).

[†] E-mail: liuchunhua@swip.ac.cn