

TRN CN8701100

CNIC-00039

SIP-0018

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

HL-1中MHD稳定性的初步实验



中國核情報中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00039

SIP-0018

HL-1中MHD稳定性的初步实验

郑永真 马腾才 肖正贵 蔡仁芳

(西南物理研究所, 四川)

中国核情报中心

北京 · 1987

摘 要

本文利用傅里叶分析的方法和相关分析的方法测到了MHD磁扰动信号的极向模数 $m=1, 2, 3, 4$ 和环向模数 n 。研究了HL-1装置等离子体MHD不稳定特征和抑制不稳定性的若干方法及结果。对于放电起始阶段的MHD特征对放电全过程的影响进行了分析。认为HL-1装置的破裂不稳定性分为三种：内破裂、小破裂、大破裂。内破裂的出现是HL-1进入较好的运行状态的一个标志。最后，给出了HL-1装置的稳定运行区域。

关键词 极向模数 环向模数 破裂不稳定性

PRELIMINARY RESULTS OF MHD STABILITY IN HL-1 TOKAMAK

**Zheng Yongzhen Ma Tengcai Xiao Zhenggui
Cai Renfang**

(Southwestern Inst. of Physics, Sichuan)

ABSTRACT

In this paper, MHD activities of HL-1 tokamak plasma are studied with Fourier transform and correlation analysis. The poloidal modes $m=1,2,3,4$ and toroidal modes n of MHD magnetic fluctuation signals are detected. Methods for suppressing MHD instabilities are suggested and tested, after MHD instabilities are studied in HL-1.

The effects of MHD characteristics in the beginning stage of discharge on the whole process of discharge are analyzed. The disruption in HL-1 device could be divided into three kinds, internal disruption, minor disruption and major disruption. The result shows that HL-1 will have a better operation condition if internal disruption appears. In the end, the stable operation region of HL-1 tokamak is also given.

一、引言

目前，托卡马克等离子体仅在很窄的运行参数范围内取得约束与加热研究方面的成果。宏观MHD不稳定性限制了托卡马克运行参数的提高，它直接影响将来聚变堆的经济效益。研究HL-1的MHD稳定性，对于保障它的稳定放电，改善它的运行参数，是非常必要的。

本文主要分析了在HL-1上观察到的MHD不稳定性的特征，讨论了抑制这类不稳定性的初步尝试，给出了HL-1稳定运行的区域。

二、HL-1的结构特点与实验布置

HL-1具有一个厚铜壳。铜壳的外半径 $R = 102\text{cm}$ ，内半径 $b = 32\text{cm}$ ，壁厚 $\delta = 5\text{cm}$ 。真空中装有活动孔栏与固定孔栏 ($a_L = 20\text{cm}$)。HL-1诊断孔道的布置与磁探针线圈的分布如图1所示。磁探针装在铜壳与真空室之间。在环向方向均匀分布四根磁探针，用来测量环向扰动模 n ；在小圆截面均匀布置相隔 45° 的八根探针用来测量极向扰动模 m 。磁探针信号被送入MHD模分析器^[1]，给出 $m = 1, 2, 3, 4$ ，与 $n = 1, 2$ 的模扰动幅值随时间的变化。同时把所需要的两个磁探针信号送入单道相关分析器，进行相关分析测量^[2]。用4mm微波干涉仪测量 n_z ；金硅面垒二极管测量软X射线的锯齿振荡；采用不同脉宽的补充脉冲送气 (H_2) 来提高等离子体密度和改善等离子体的参数；PV-10压电晶体阀采用脉冲控制送气，最大送气量为 $3.3 \times 10^7 \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

HL-1的实验参数范围如下：

初始气压 p_0	$5.3 \times 10^{-2} - 2.0 \times 10^{-1} \text{Pa}$
纵向磁场 B_T	1.2—2.4T
欧姆电流 I_p	50—135kA
孔栏半径 a	16—20cm

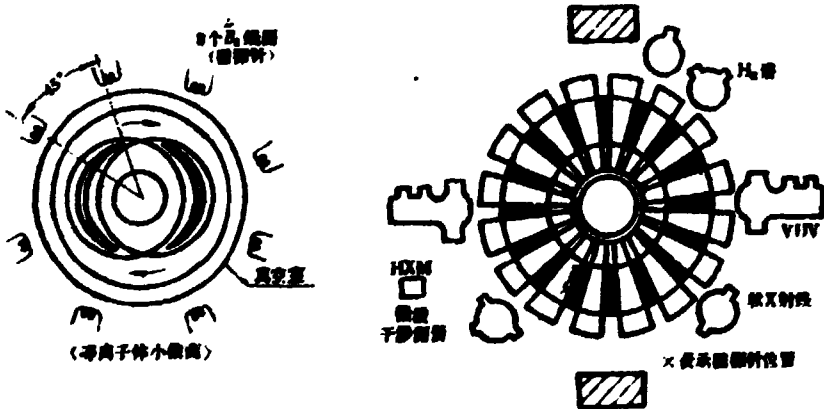


图1 有关诊断孔道的布置和磁探针的分布

三、HL-1的破裂不稳定性

托卡马克的宏观不稳定性的外观特征是等离子体参数的扰动，尤其极向场的扰动与等离子体中心发出的软X射线的锯齿振荡。HL-1上出现的宏观MHD不稳定性分为增长率较小的低频振荡(即米尔诺夫振荡)与破裂不稳定性。

米尔诺夫振荡具有模结构为 $\exp(im\theta - in\phi)$ 的电流磁场扰动的特征，模的幅值增长较慢，对应的环电压上不会出现负尖峰(如图2)，此种不稳定性对放电不会带来太大的影响。但在一定条件下也能导致增长的破裂不稳定性。破裂不稳定性是低 q 值高密度运行的严重障碍。HL-1上所观察到的破裂不稳定性大致可分三类：内破裂、小破裂和大破裂。

(一) 内破裂

在HL-1的宏观稳定放电中，从等离子体中心区发出的软X射线具有明显的锯齿形振荡(图3)^[7]。从紧靠中心处 1° 和离中心稍远处 2° 所发出的软X射线信号中锯齿振荡的形状刚好相反，但周期相同， $\tau \approx 2\text{ms}$ 。这些都是内破裂的典型特征。这是因为，等离子体中心温度较高，比起周围有较高的电流密度 $j(\phi)$ ，在欧姆加热下中心部分电流愈来愈大，使中心的 $q(\phi) < 1$ ，这样在 $q=1$ 的磁面上出现 $m=1$ ， $n=1$ 的撕裂模，产生内破裂。这种不稳定性使得在 $q=1$ 面的内外两侧的等离子体位置交换，导致中心温度突然下降，而 $q=1$ 面外的等离子体温度突然上升， $q=1$ 面内外温度变平。当内部温度下降到使 $q(\phi) > 1$ 时，内破裂停止；于是，

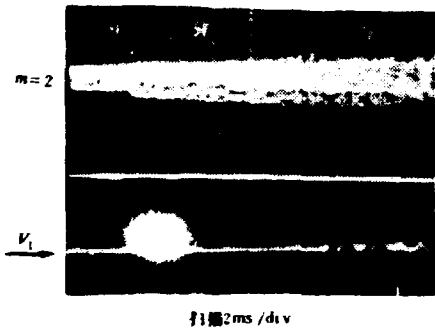
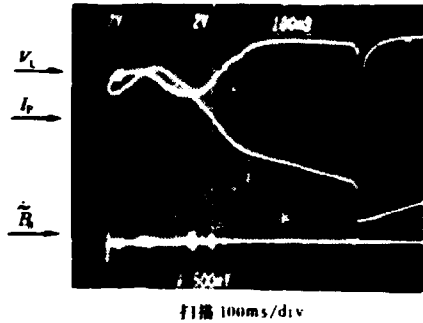


图2 增长率较小的极向场低频扰动(米尔诺夫振荡)的特征
下图是在坪区180~190ms模结构扩展图

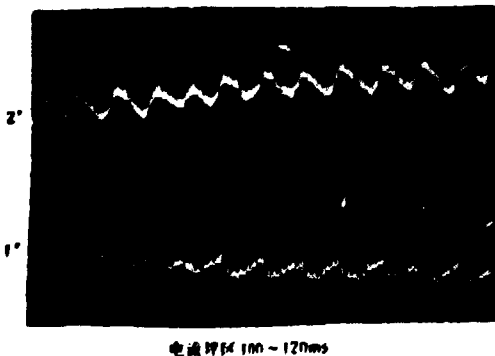


图3 宏观稳定放电中软X射线锯齿振荡的典型波形
 $B_r = 2.1\text{T}$ $I_p = 10\text{kA}$ 扫描: 2ms/div

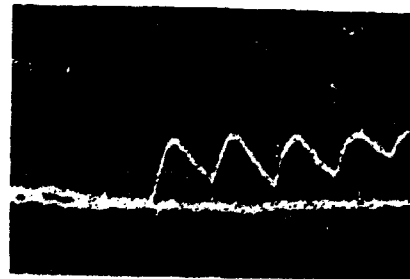


图4 用脉冲送气导致电流通道收缩而发的软X射线的锯齿振荡
扫描2ms/div

在欧姆加热作用下，中心区温度又缓慢上升，外侧的温度相应地缓慢下降。上述过程反复进行，就导致中心处软X射线信号出现“正锯齿”振荡，外部出现“反锯齿”振荡。图3中可明显看到1°为正锯齿振荡，而2°是反锯齿振荡。从而可以确定这次放电 $q=1$ 的磁面半径小于3cm。HL-1装置在宏观稳定放电中，观察到内破裂的出现，它标志着HL-1已进入正常的较好的托卡马克放电。

内破裂是因为等离子体电流在中心区的分布太陡所致。当中心电流密度 $j(o)$ 超过 $10^7 \cdot B_z / 2\pi R$ 的水平时^[4]，即 $q(o) < 1$ ，就发生内破裂。为了证实这一点，我们对于没有出现内破裂的放电施加补充脉冲送气，强迫等离子体电流通道收缩，从而激起内破裂（见图4）

(二) 小破裂

这类不稳定性具有以下特征：环电压波形上相应出现负尖峰（不超过10伏），等离子体的大半径突然收缩，小半径突然扩张；极向扰动场的幅值一般是极向场的2%左右。但此类不稳定性在放电过程中往往会受到等离子体自身的抑制，而不会导致电流的断裂。

在HL-1上，小破裂通常出现在电流上升段和平顶段（ $t=100-200ms$ ）。在平顶段出现的小破裂是由 $m=2$ 扰动增长激发起来的（图5），在破裂之前，虽然存在 $m=2$ 和 $m=3$ 的模的耦合，但后者非常小（ $\bar{B}_2/B_0 \sim 2.6\%$ ， $\bar{B}_3/B_0 \sim 0.6\%$ ）。所以，在HL-1上这种破裂似乎由单模（ $m=2, n=1$ ）扰动直接发展起来的。虽然一般来说它不会使电流突然中断，但在环电压波形上能产生相当大的负尖峰（见图6）。

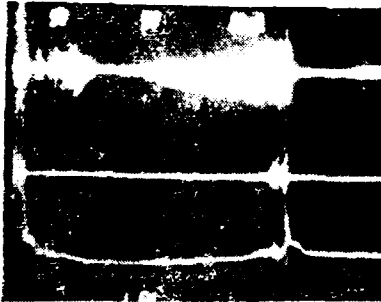


图5 电流坪区MHD不稳定性的演变情况

上线： $m=2$ 模扰动
 中线： $m=3$ 模扰动
 下线：环电压
 $B_T=1.6T, I_p=100kA$
 扫描20ms/div

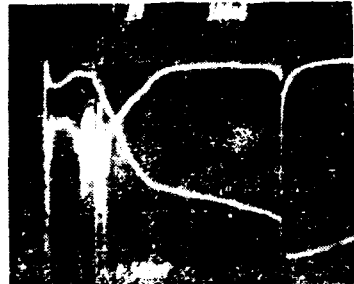


图6 MHD破裂不稳定性的出现在环电压上的表现

上线：环电压
 下线：环电流
 $B_T=1.6T, I_p=100kA$

通过软X射线锯齿振荡信号，磁探针组信号的傅里叶分析，水平位移探针的和差信号与环电压对照分析，可以清楚地看到这种破裂前后的整个扰动的发展情况。图7是典型的一组示波图。破裂发生在放电开始后142ms，等离子体径向向内移动(a)，环电压波形上出现一系列负尖峰(b)、(c)，在较大负尖峰之前存在 $m=2, m=3$ 的振荡(c)，同时在中心区域出现内破裂(d)。从(c)、(d)上可以看到，小破裂发生之前， $m=1$ 与 $m=2$ 扰动已衔接在一起，相互耦合。这表明在 $m=2$ 的振荡明显地被破裂（ $m=1, n=1$ 的扰动）所调制，这一特点在环电压

波形上表现得十分清楚，这就是所谓的预破裂。这种振荡的幅值达到一定程度就发生破裂不稳定性。关于电流上升段出现的小破裂的特征将在下一节进行详细讨论。

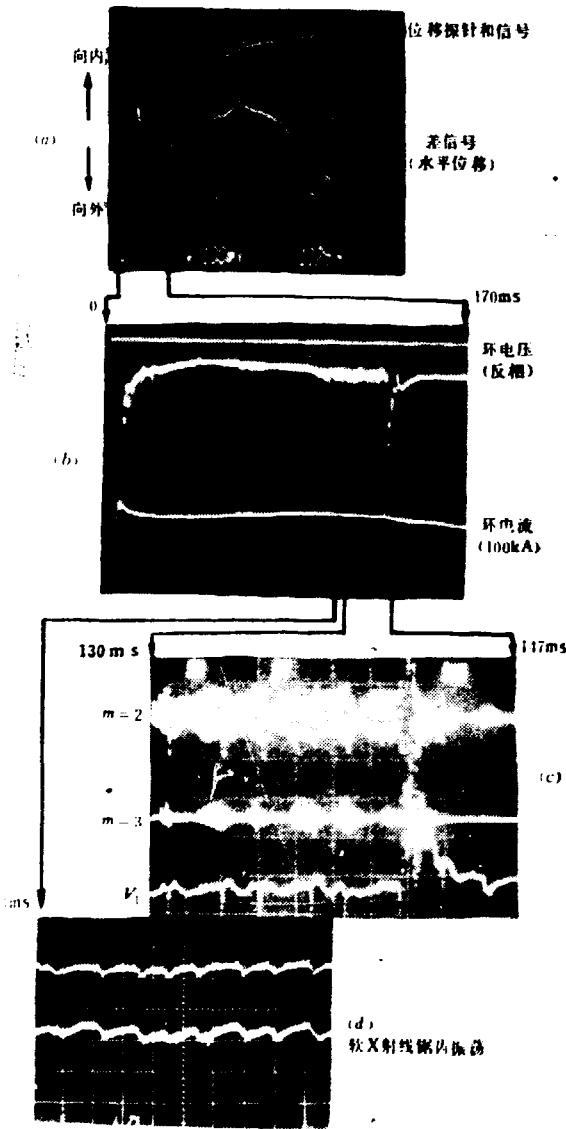


图7 在小破裂前后扰动模的发展变化情况

- (a) 水平位移探针的和差信号 (b) 环电压, 环电流
 (c) $m=2, m=3$ 扰动模信号 (d) 软X射线锯齿信号
 $B_T=1.6T, I_p=100kA$

(三) 大破裂

大破裂是引起等离子体电流突然熄灭的一类破裂不稳定性，是威胁性很大的 MHD 不稳定性。上述的小破裂发展到一定程度就会导致电流的断裂。虽然 HL-1 上多次出现小破裂都被系统本身抑制了，最后仍恢复正常放电。这可能是由于铜壳的反馈作用。

至今, 在HL-1装置上仅观察到若干次大破裂。它大致可分三类: (1) 由于等离子体平衡不好 (见图8), 水平杂散场没有得到补偿, 等离子体碰壁而使电流中断。电流突然下降之前有一个小反冲, 然后在10ms左右短时间内从坪区的高电流值突然降到零, 相应地在环电压上引起很大的正尖峰。(2) 由于初始气压太高, 又附加脉冲送气, 导致密度太高, 超越了 $Z_{eff} \sim 3$ 的放电条件下稳定运行的高密度极限。结果, 导致电流很快熄灭 (见图9)。(3) 由于杂质太多所致。图10是将没有清洗的活动孔栏往固定孔栏内伸入1cm时发生大破裂的示波图。由于等离子体与较脏的活动孔栏强相互作用, 杂质大增, 导致形成大破裂。后来, 活动孔栏经多次放电清洗后, 就没有出现类似的大破裂。

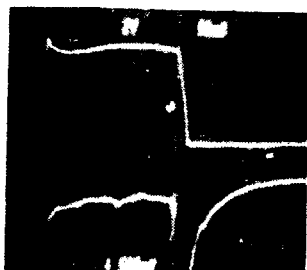


图8 由于平衡不好, 引起的大破裂不稳定性

$B_T = 1.52 T$ $I_p = 65 kA$

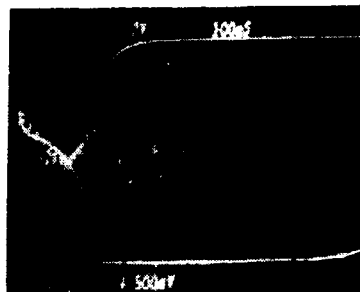


图9 密度太高引起的大破裂不稳定性

上线: 环电压 下线: 环电流
 $B_T = 2.06 T$ $I_p = 100 kA$
 $\rho_0 = 0.20 P$ 补充送气脉宽100ms

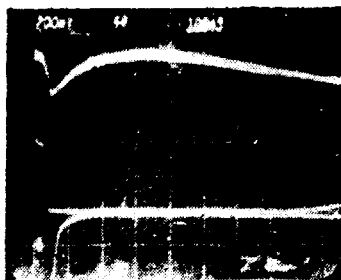


图10 杂质太多引起的大破裂

上线: 初线电流
 中线: 环电流 I_p
 下线: 环电压 V_L
 $B_T = 1.9 T$ $I_p = 85 kA$
 $a_L = 19 cm$

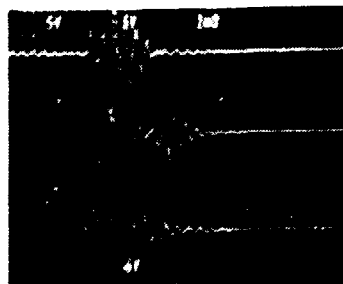


图11 电流上升段的MHD模结构的变化

上线: $m = 2$ 余弦分量
 中线: $m = 3$ 余弦分量
 下线: $m = 4$ 余弦分量
 上升速率 $dI/dt = 30 kA/ms$

四、等离子体电流上升段MHD的不稳定性

HL-1放电时常常在初始阶段出现MHD不稳定性。在环电压上升以后约3ms, 气体被击穿, 产生等离子体电流, 在环电压上产生一些正的扰动, 因此出现一系列负尖峰。磁探针

信号经空间傅里叶分析给出的结果(见图11)表明,这是一种多模式的螺旋扰动,其中有 $m=4, 3, 2$; 由于探针数目的限制未能观察到更高次的模。不稳定发展期间有显著的模耦合,它导致环电压上出现负尖峰。若减低电流上升速率,则环电压上只出现米尔诺夫的振荡和个别的小负尖峰,基本上不出现小破裂。此时,磁探针给出的 $m=2$ 的扰动信号已完全消失,只残留小部分 $m=3$ 的扰动(见图12)。

图13是相隔 90° 的两个磁探针的相关分析计算机处理结果。在电流上升快的情况下,磁场扰动变化幅值很大。减慢电流上升速率以后,扰动幅值显著变小。电流上升速率愈快,则破裂开始的时刻离击穿与电流形成的时刻愈短。

这种电流上升段出现的 MHD 不稳定性主要和放电初期等离子体中心凹陷的电流密度分布有关², 这种电流分

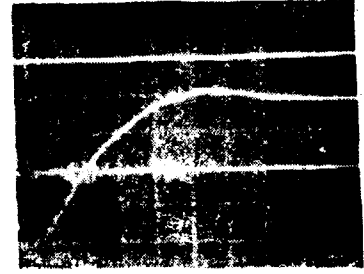


图12 电流上升较慢 $dI/dt = 9kA/ms$ 时 $m=2, m=3$ 模的变化
 上线: $m=2$ 模的变化
 中线: $m=3$ 模的变化
 下线: 电流上升段
 扫描: $2ms/div$

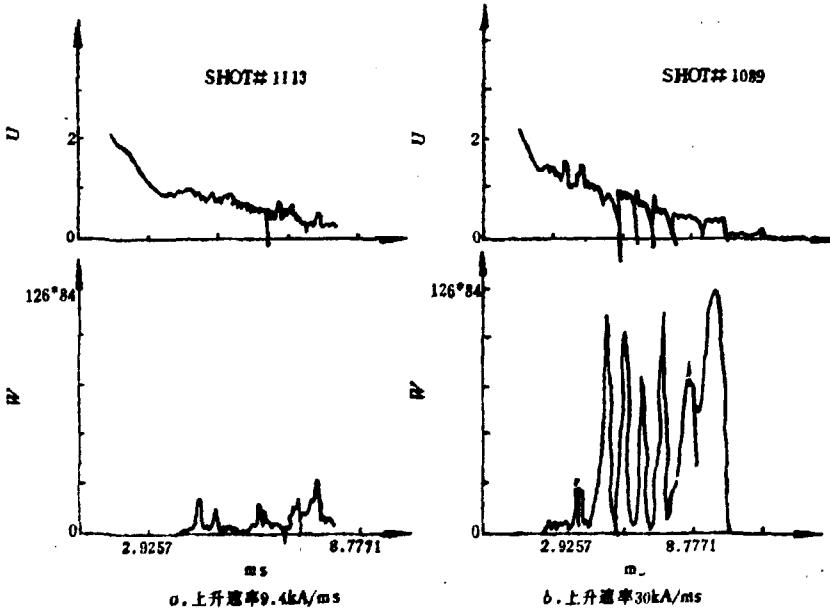


图13 相隔 90° 的两磁探针相关测量的结果

a. 电流上升速率慢, b. 电流上升速率快。两种情况的磁扰动幅值的比较

上图: 环电压 V_L 。

下图: 极向磁场扰动函数 $W = [\int (x-y)dt]^2$; x, y 分别为探针的信号

布容易产生较强的趋肤效应而导致双断裂模不稳定性。在破裂过程中,通常在一个很快的负尖峰后紧跟着出现较大的压尖峰,这将导致电子温度的显著下降⁶⁵。实验表明,电流上升段出现的小破裂不稳定性对电流平顶段的等离子体品质有明显的影响。在保持良好的等离子体平衡位置情况下,只要电流上升速率适中,而且上升段不出现 $m=2$ 的扰动,则在电流平顶区一般是不会出现小破裂的。图14给出典型示波图。从图中可看到(a)在电流上升段没有出现 $m=2$ 的扰动,从环电压与MHD模结构分析来看,平顶段无任何扰动

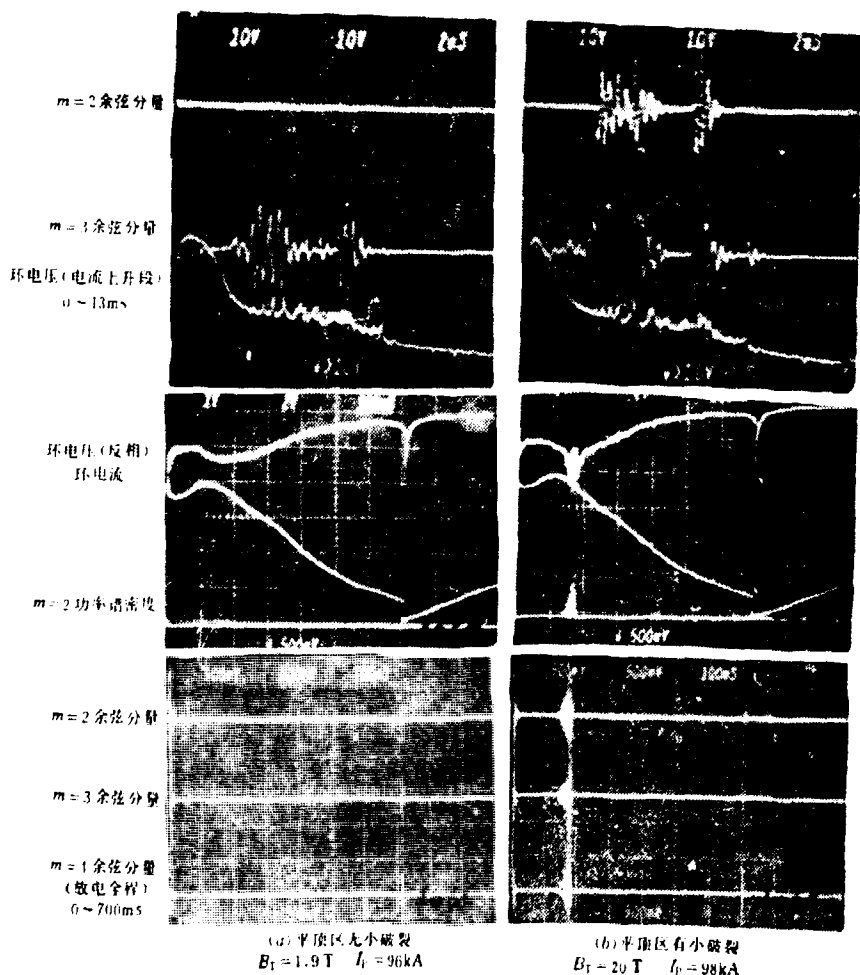


图14 放电初始阶段 $m=2$ 的扰动对平顶段等离子体品质的影响

与破裂，而（b）情况刚好与（a）相反。其原因可能与杂质含量的增加有关。例如：电流上升段出现破裂不稳定性时，CIV（312 Å）线强度显著上升^[8]；图15中上面一条线是真空紫外谱仪测得的示波图，波形上的振荡对应于环电压上的负尖峰。CIV的强度峰迟后负尖峰约1ms，这表明在发生破裂时，等离子体与孔栏的相互作用加强。由于在上升段出现一系列破裂，导致等离子体与孔栏及器壁多次强相互作用，轰击出大量杂质，从而导致平顶区的宏观不稳定性的发展。

实验中，我们已发现两种可以减少上升段发生小破裂的次数与强度的方法。第一种是减少电流上升速率。第二种是在较高的初始气压基础上，采用补充脉冲送气注入冷的中性气体。前者效果明显，后者因设备缘故，有待于深入研究。



图15 放电初始阶段，由真空紫外谱仪测得CIV线的强度变化
 上线：CIV（312.2nm）
 下线：电流 I ，（反相）

五、HL-1稳定运行区域

引起HL-1托卡马克等离子体宏观不稳定性的外界因素，大致有以下几种：(1)安全因子 q_L 值下降；(2)密度过高或过低；(3)等离子体柱平衡不好；(4)不适当地注入冷的气体；(5)真空室比较脏等。在一定有效 Z （等离子体中离子电荷数）下，托卡马克稳定运行区域的边界主要由等离子体密度和电流所决定。从大量的实验数据中，用归一化方法，我们得出了HL-1目前运行范围的稳定区域，如图16所示。

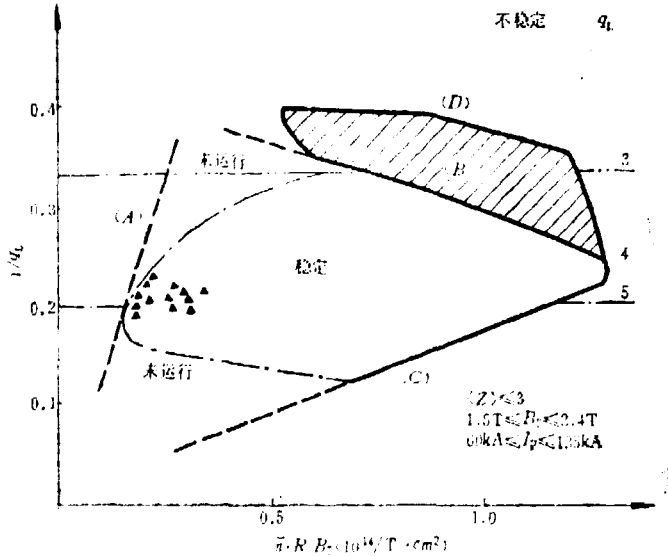


图16 HL-1稳定运行区域

- 点划线之内为已运行区域中的稳定区。
- 三条粗实线是稳定边界(A)、(B)、(C)。
- (D)粗实线是在 $a \leq 19$ 和外加补充送气的条件下外扩的稳定边界，在(B)与(D)之间的区域偶尔出现破裂不稳定性。
- ▲表示在(A)边界附近的稳定点。

在稳定区域内，放电稳定，环电压和电流波形光滑，整个放电过程除了初始的8ms阶段以外，磁探针几乎无极向场扰动信号输出（见图17）。稳定区域基本上有三个边界(A)、(B)、(C)，它们分别由低密度极限、 q_L 值极限和高密度极限值所决定。边界(A)给出最低的密度极限，处于此密度时，一切放电都是逃逸放电。由于诊断方面的困难，边界(A)尚未完全确定。幸运的是在 $q_L = 5$ ， $\frac{\bar{n} \cdot R}{B_T} = 0.15$ 附近区域具有大量稳定实验点(▲标志)，而不是逃逸放电，因而可以估计出边界(A)。当放电参数接近边界(C)时，则出现电阻性放电、等离子体中心区的辐射损失明显地增大， H_α 线强度明显增高，电子温度下降；边界(C)给出HL-1稳定运行的最大密度极限、当 $(\bar{n} \cdot R / B_T)$ 超过 $1.2 \times 10^{16} / (T \cdot \text{cm}^2)$ ， q_L 小于5时，放电的结果往往产生大破裂（见图9），电流很快消失。在边界(B)上将由低 q_L 导致破裂不稳定性；边界(B)给出了运行时的 q_L 的极限值。基于低 q 高密度运行条件的重要性，我们着重研究了HL-1

稳定运行区域边界(B)。在孔栏半径 $a=20\text{cm}$ 情况下,等离子线平均密度 \bar{n} 由 $1.14 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.92 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, q_L 值从5.1减少到3.1,只要保持平衡,该区域的放电就可保持稳定。 $q_L=3$ 似乎是HL-1放电不可逾越的极限。凡是 $q_L < 3$ 的放电都产生小破裂。这时环电压上出现较大的负尖峰(见图18),并常有 $m=2, 3, 4$ 多模扰动出现,但是电流却不断裂。

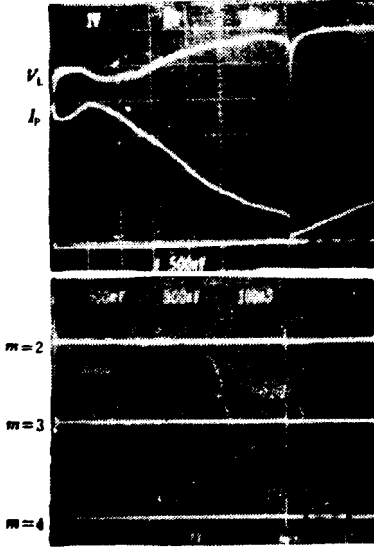


图17 稳定放电的典型示波图
 上图: 上线, 环电压; 下线, 环电流。
 下图: 上、中、下线分别为 $m=2, 3, 4$ 模扰动信号。
 $B_T=1.96\text{T}$ $I_p=100\text{kA}$

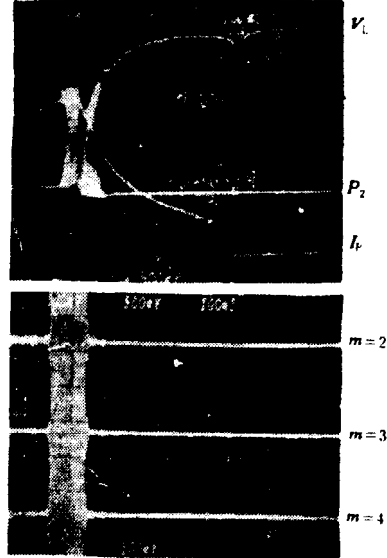


图18 典型不稳定放电
 上图: 上线环电压; 下线环电流;
 中线 $m=2$ 的功率谱密度。
 下图: 上、中、下线分别为 $m=2, 3, 4$ 模扰动。

我们采用缩小孔栏半径与施加补充脉冲送气的办法来降低 q_L 值。在总电流 I_p 保持不变的条件下,把孔栏半径缩小到16cm时,成功地实现了纵场为2.16T、环电流为108kA的稳定放电。在上述放电条件下,又适当加入了补充脉冲送气,不但降低了 q_L 值,而且线平均密度 \bar{n} ,增加到 $2.6 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 。利用上述方法把稳定区域的(B)边界向外扩展到(D)。



图19 由于补充送气不合适,激起破裂不稳定性放电
 上线: 环电压; 下线: 环电流,
 $B_T=2.1\text{T}$ $I_p=100\text{kA}$
 补充送气脉冲宽度: 120ms

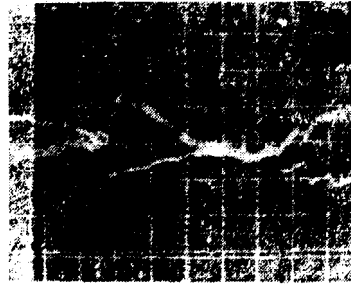


图20 缩小孔栏半径导致内破裂的产生

当然, 孔栏半径太小或者补充送气过量, 不但达不到降低 q_L 和增加密度的目的, 反而会激起破裂。如图19所示。所以, 有必要把现有的向真空室连续送气外加补充送气的方式改成程序脉冲送气方式, 从而达到对电流密度分布进行“优化”, 抑制不稳定性发展。

在上述的 I_p 保持不变的情况下, 适当地缩小孔栏半径产生明显的抑制不稳定性作用的原因, 可作如下解释。

I_p 不变条件下, 缩小孔栏半径将会使电流通道压缩, 使得电流密度陡增, 继而产生内破裂, 使中心区的电流密度分布“平化”。作为这种解释的实验依据是孔栏半径缩小常常导致内破裂的产生, 如图20所示。若电流平化只局限在 $q=2$ 的磁面内部, 那么这种电流分布的变化将抑制破裂不稳定性。但是, 若电流“平化”延续到 $q=2$ 的面, 势必增大那儿的电流梯度, 反而引起不稳定性。因而只有适当地缩小孔栏半径, 才能产生抑制破裂不稳定性的作用。此外, 孔栏半径的缩小也减少了等离子体与器壁的相互作用, 减少了一部分冷等离子体, 从而改善了等离子体外部区域的电导率, 提高了 $q=2$ 面外侧电流的增稳作用。

六、结 论

基于对HL-1宏观MHD的研究, 发现HL-1中 $m=2$ 模的增长不会导致放电电流中断, 这说明HL-1磁束系统的性能比原来预计要好得多。这主要是厚铜壳的作用结果。

HL-1的破裂不稳定性主要出现在放电初期的8ms和到达平顶后100ms~200ms之间。对于前者产生的原因, 主要是电流上升过快引起等离子体电流的趋肤效应造成的。它可通过控制电流上升速率来克服。对于平顶段产生小破裂的原因, 有待深入研究, 不过从初步观察到的实验结果分析来看, 这些不稳定性大部分是由 $m=2$, $n=1$ 的螺旋扰动与 $m=1$, $n=1$ 的扰动耦合激发起来的; 少量的放电是由 $m=2$ 与 $m=3$ 等磁岛叠加所致。

由于电流上升段产生的小破裂不稳定性导致等离子体与孔栏及器壁强相互作用, 使得杂质含量大增, 造成电流坪区宏观不稳定性的发展与加强, 引起破裂等外界原因是不可忽视的。

实验结果还表明, 适当缩小孔栏半径, 采用补充送气等措施, 在一定范围内可以降低HL-1的 q_L 值极限和外扩稳定运行的低 q 边界。若进一步改善和补充对电流密度分布进行整形的有效手段与保持放电过程中等离子体的良好平衡的措施, 则完全可能进一步降低 q_L 值, 扩大稳定运行区域。

参 考 文 献

- [1] 郑永真等, HL-1的MHD模分析器, 待发表, (1985)。
- [2] *Journal of the Physical Society of JPN.*, 54, No. 5, 1823 (1985)。
- [3] S.J. Fielding, *et al.*, *Nucl. Fusion*, 17, 1382 (1985)。
- [4] M. Nagam, *Nucl. Fusion*, 22, 409 (1983)。
- [5] Ноткин, Г. Е. Физика Плазмы Т. 11/62 (1985)。
- [6] 郑永真等, 磁探针信号的相关分析测量, 待发表, (1985)。
- [7] 郭干城等, HL-1的软X射线锯齿振荡的研究, 待发表, (1985)。
- [8] 李可华等, HL-1的真空紫外光谱研究。

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



China Nuclear Information Centre
