

CT-6B 托卡马克装置中软 X 射线辐射及扰动

戚震枝 郑少白

(中国科学院物理研究所)

1983 年 5 月 4 日收到

提 要

软 X 射线诊断是研究托卡马克等离子体不稳定性的重要手段。本文给出用 Au(Si) 面垒探测器阵列测量 CT-6B 托卡马克等离子体软 X 射线的结果,以及各种等离子体不稳定性时的软 X 射线辐射空间分布特性。

一、前 言

托卡马克装置中 0.5—10keV 的软 X 射线辐射主要来自电子的韧致辐射和杂质离子的复合辐射。在逃逸现象不严重的等离子体中,软 X 射线的辐射强度主要由等离子体的密度、电子温度及有效电荷数决定。等离子体内各种各样的不稳定性都能引起上述参数的扰动,从而使软 X 射线信号产生扰动,因此软 X 射线扰动测量一开始就成为研究等离子体内部扰动的有力武器^[1]。空间分辨多道软 X 射线探头及其扰动测量,配合复杂的计算机处理已给出托卡马克等离子体内磁岛结构及宏观不稳定性发展的图象^[2]。本文给出 CT-6B 托卡马克中空间分辨软 X 射线扰动测量的主要结果。由于在软 X 射线波段,韧致辐射和复合辐射强度随温度上升指数增加,因此由简单图象看出准直之后的探头信号主要反应温度最高点的信息,故从我们得到的信号可以看出 CT-6B 装置等离子体不稳定发展的一些简单图象。

二、实验方法

CT-6B 装置由 CT-6 装置^[3]改装而成。做软 X 射线实验时,装置运行主要参数如下:

- 大半径 $R = 45\text{cm}$;
- 隔板半径 $a = 12.5\text{cm}$;
- 纵向磁场 $B_z = 9\text{kGs}$;
- 等离子体电流 $I_p = 25\text{—}30\text{kA}$;
- 电子温度 $T_e = 150\text{—}200\text{eV}$;

$$\text{中心道线电子密度 } \int n_e dl = \begin{cases} 3 \times 10^{14}/\text{cm}^2 & (\text{无补充送气}) \\ 5 - 7 \times 10^{14}/\text{cm}^2 & (\text{有补充送气}). \end{cases}$$

环电压由单匝环测得;等离子体电流由罗可夫斯基线圈测得;水平位移由余弦及鞍形线圈测得(正信号表示向内运动);电子密度由4mm微波干涉法测得;电子温度由软X射线强度计算得到^[4];我们同时用碘化钠晶体监视硬X射线的辐射。

软X射线探测器为国产金硅面垒半导体探测器。装置上装有8个,其中7个(称它为1#—7#)组成一个阵列,放在装置外侧,带有一个共同的装有吸收膜的准直孔,通过准直孔不同探头可测到不同弦上的软X射线强度。阵的安排见图1。各个探头准直弦径和等离子体柱水平位移关系如表1。准直孔上的吸收膜为喷有厚度为3000 Å 铝的无氧聚酯膜,膜本身厚度为1000 Å。此膜的作用是阻挡大于40 Å 的辐射及由等离子体中发射粒子对探头的轰击。整个探测系统接收辐射的光谱范围为0.3—25 Å,长波限由探头金层决定。

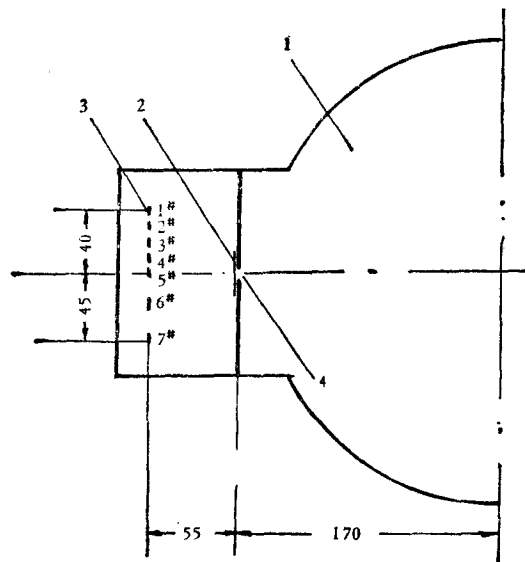


图1 探头阵空间布置示意图

1 为托卡马克真空室; 2 为吸收膜;
3 为软X射线探头; 4 为准直孔

表1 探测器准直的等离子体弦径 (cm)

探头号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	
等离子体水	-1	-10.6	-8.6	-6.2	-3.2	0	6.8	11.4
	0	-10.0	-8.1	-5.8	-3.0	0	6.4	10.8
平位移 cm	1	-9.4	-7.7	-5.5	-2.9	0	6.1	10.1
	2	-8.8	-7.2	-5.1	-2.7	0	5.7	9.5
	3	-8.2	-6.7	-4.8	-2.5	0	5.3	8.9

另一个探头(0#)放在离上述探头阵相差大环角为90°的水平赤道面上,主要用来监视辐射的大环对称性。

探头的输出信号经 1.5MHz 宽带放大器放大之后由波形记录仪记录, 示波器显示。整个测量系统的框图如图 2。波形记录仪的最高记录速度为 40kc。系统有效通频带为 0—10kc。系统最大电流放大倍数为 $5 \times 10^9 \text{V/A}$ 。常用的电流放大倍数为 $5 \times 10^6 \text{V/A}$ 。系统最后输出为负信号。

由于仪器限制, 目前一次放电只能同时记录四道软 X 射线信号。

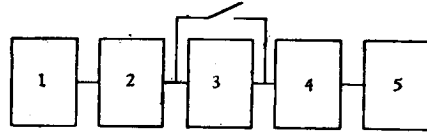


图 2

- 1 为金硅面垒探测器; 2 为直流放大器;
- 3 为 RC 高通滤波器; 4 为波形记录仪;
- 5 为示波器

三、稳定放电时软 X 辐射及内破裂

在没有负反馈控制时 CT-6B 装置稳定放电时间可持续 20—40ms。放电中止是由于加热场只用一组电容器供电, 放电时电容器电压不断下降造成。图 3 给出典型放电下等离子体电流 (c), 水平位移 (d), 中心道软 X 射线辐射 (b) 及线电子密度 (e) 的变化图。补充送气在放电 10ms 后启动阀门进行, 阀门打开持续时间为 25ms。

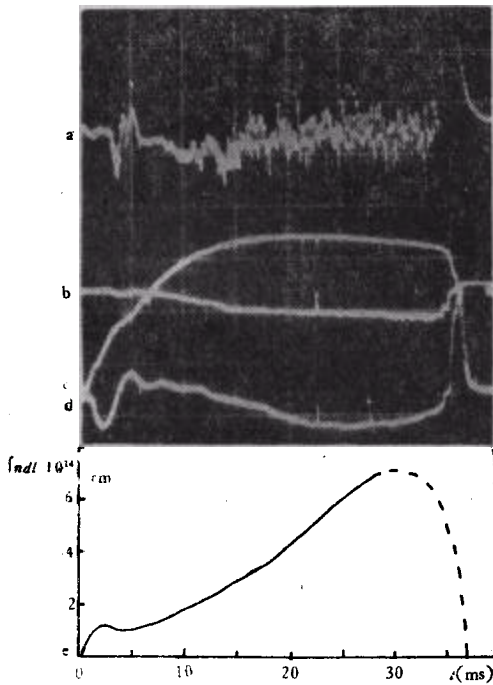


图 3 正常放电下参数变化图

- a 为软 X 射线的扰动分量 $S\tilde{X}$
 - b 为软 X 射线辐射 SX;
 - c 为等离子体电流 I_p (10kA/格);
 - d 为等离子体水平位移 $I_p \Delta x$ (40kA·cm/格);
 - e 为线电子密度 $\int n_l dl$ ($2 \times 10^{-4} \text{dm}^{-2} \cdot \text{格}^{-1}$);
- 时标 5ms/格

图 3 中信号 a 为信号 b 经 RC 滤波器之后再放大 40 倍得到的, 它反映软 X 射线信

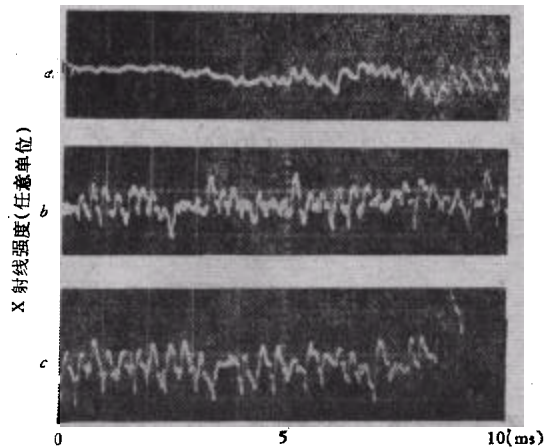


图 4 软 X 射线信号的扰动结构

- a 为 6—16ms 的信号; b 为 16—26ms 的信号;
- c 为 26—36ms 的信号; 时标 1ms/格

号扰动情况. 为更仔细观察软 X 射线信号的扰动, 图 4 给出图 3 a 信号分段扩展 5 倍之后的结果. 从图 3 及图 4 看出, 随着放电的进行, 等离子体的电子密度、电子温度不断上升, 软 X 射线信号逐渐变强, 同时它的扰动也不断加强. 通常电流上升到平台之前扰动比较小, 达到平台之后扰动信号变大, 可达总信号的 5%. 扰动信号的结构比较复杂, 但大致可分成两类: 1. 扰动信号较小、频率稍高 (4—5kc) 无规的内模信号, 2. 信号较大、但频率稍低 (2—3kc) 具有锯齿结构的内破裂信号. 扰动信号开始以内膜为主, 放电后期转入以内破裂为主.

由内破裂引起软 X 射线信号的锯齿振荡是托卡马克中等离子体不稳定的重要实验现象. 其理论解释是^[5], 由于等离子体中心温度较高, 因此比起周围有较高的电流密度, 在欧姆加热下, 中心部分电流越来越大, 使中心部分的安全因子 q 小于 1, 这样在 $q = 1$ 的磁面上出现 $m = 1$ 的撕裂模, 不稳定性使 $q = 1$ 面内外温度变平. 由于上述过程反复进行, 这样中心处软 X 射线信号出现“正锯齿”, 外部为“反锯齿”, 而通过 $q = 1$ 面上的软 X 射线信号是不变的. 在 CT-6B 上观测到典型内破裂软 X 射线信号的扰动如图 5. 从图中可明显看出 2#, 3# 为“反锯齿”信号, 而 4#, 5# 为“正锯齿”信号. 也就是说在这次放电中 $q = 1$ 的磁面约在 $r \approx 4\text{cm}$ 的区域. 一般地说内破裂在大装置上比较容易观测到. 在小装置中报道较少^[6].

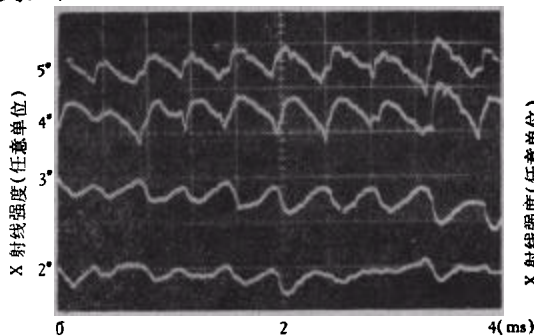


图 5 时标 $400\mu\text{s}/\text{格}$

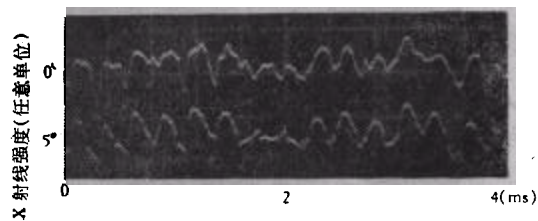


图 6 0# 和 5# 探头扰动信号比较; 时标 $400\mu\text{s}/\text{格}$

为了解正常放电下软 X 射线扰动部分沿大环方向的对称性, 我们比较了大环角相差 90° 的 0# 和 5# 两个对称探头信号之扰动部分. 我们发现两个信号之间的关系比较复杂, 它们由几组不同 n 值的信号组成. 但幅度扰动最大的相位, 两者经常一致, 典型示波图如图 6. 即在 CT-6B 中对于比较大的扰动都具有 $n = 0$ 结构. 一般说 $n \neq 0$ 的扰动信号比较小.

四、不稳定放电时软 X 射线信号的扰动

不稳定放电是指放电中等离子体的宏观参数(如电流 I_p 、位移 Δx 、环电压 V_p 等)有明显突变. 这些宏观参数突变的同时, 我们观测到软 X 射线信号的强烈扰动, 扰动幅度很大, 可与总辐射信号相比. 观察这种扰动的空间分布, 可得到有关不稳定放电时等离子体变化图象.

在 CT-6B 装置中, 按产生的原因, 可将不稳定放电分成两类: 由于密度增加而出现

的不稳定放电(简称 A 型)和由于位移不稳定产生的不稳定放电(简称 B 型)。以下分别说明:

A 型不稳定放电 主要发生在下列三种情形: 1)过量的补充送气; 2)真空室放电清洗次数不够; 3)由于位移不稳定发展使等离子体和器壁发生强烈相互作用之后,接着出现 A 型不稳定性放电。但当真空室经过足够多的清洗放电之后,第 3 种情况就不存在了。图 7 给出 A 型不稳定放电时 I_p , V_p , $I_p \Delta x$ 及 4# 软 X 射线探头信号变化图。从图中看出不稳定发生时,等离子体大半径变小,等离子体电流突然变大,环电压出现负尖峰,说明等离子体内感变小,小半径扩张,这正是典型的托卡马克破裂不稳定性,不稳定性发展时间小于波形记录仪的分辨时间 ($< 40 \mu s$)。不稳定发生之后等离子体并不马上消失,稳定一段时间之后再次重复出现。重复频率随着清洗放电次数增加而下降,随着加热场电场增加而增加,一般小于 1kc, 比起内模和内破裂的频率要小。

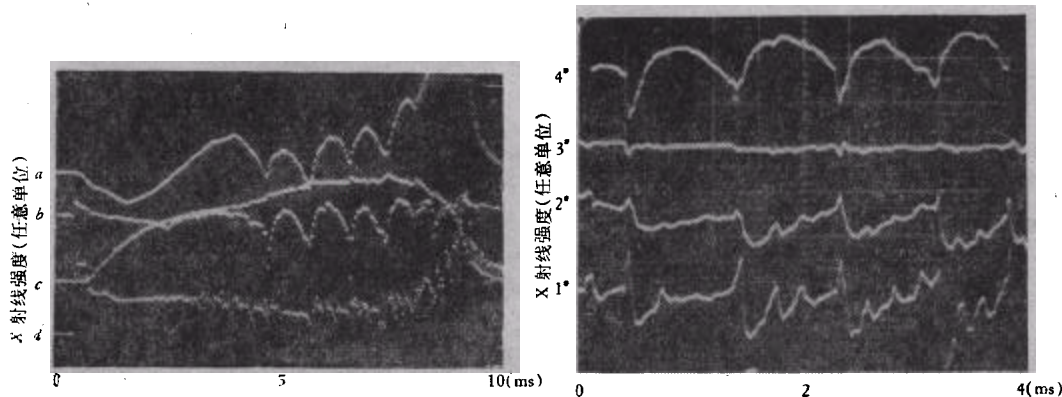


图 7 a 为 $I_p \Delta x$ (16RA·cm/格);
b 为 4# 软 X 射线探头信号;
c 为 I_p (10kA/格);
d 为 V_p (8V/格);时标 1ms/格

图 8 时标 400 μ s/格

图 8 给出 A 型不稳定振荡时 (即图 7 中 4.3—8.3ms) 1#—4# 探头记录的空间软 X 射线信号的空间分布。从图中明显看出,当发生不稳定性时,4# 信号迅速变小,而 1#, 2# 信号迅速变大,3# 信号基本不变,基本物理过程和内破裂类似。即由于密度太高^[7],边缘冷却,电流通收缩,最后引起宏观不稳定,使温度和电流抹平,但比起内破裂,A 型不稳定涉及的范围及幅度要大得多。

从图 8 中还可以看出在周期地发生 A 型不稳定性的同时,软 X 射线信号中还带有一个频率更高的扰动 ($\approx 3kc$),而 A 型不稳定经常发生在上述扰动最强烈时刻。图 9 给出一次 A 型不稳定放电时 1# 和 7# 探头信号的扰动部分。两个信号基本上反向,故这种信号不属于 $m = 0$ 扰动,由图 1 可知,1# 和 7# 探头对应的弦径夹角为 105° ,因此上述扰动也不属于 $m = 1$ 的扰动。

B 型不稳定放电,在托卡马克装置中,等离子体柱向外或向内运动到一定距离时,就要发生位移不稳定^[8]。发生位移不稳定的原因有等离子体柱半径的减小,平衡场形态因子^[9]的改变,隔板的作用^[10]等等。在 CT-6B 装置中发现等离子体柱向内位移时极易发生位移不稳定性,从而导致等离子体迅速消失,它和文献[10]的预言一致。但当向外运动发

生位移不稳定性时，一般地说等离子体并不马上消失。经过一次强烈的不稳定之后建立一个新的稳定状态，典型的放电示波图如图 10。图 11 给出在等离子体柱发生不稳定前、后时刻软 X 射线信号扰动部分及等离子体参数的时间扩展图。从图 11 看出发生 B 型不稳定性时的特点：1) 在发生不稳定性前 2—3

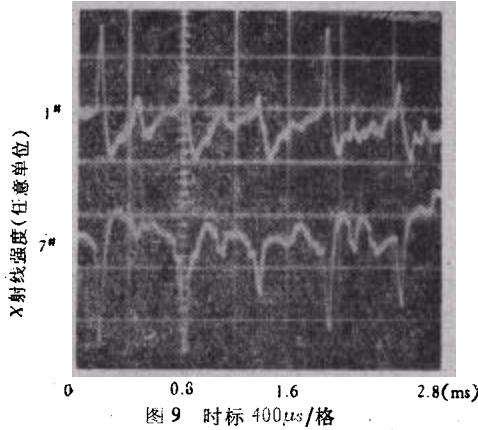


图 9 时标 400 μ s/格

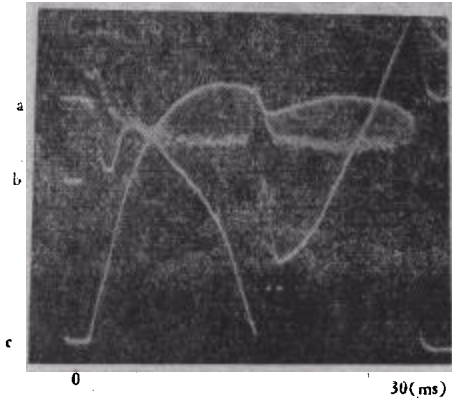


图 10 B型不稳定放电示波图

a 为等离子体位移 $I_p \Delta x$ (16kA·cm/格) (负信号表示位移向外); b 为环电压 V_p (4V/格); c 为等离子体电流 I_p (5kA/格); 时标 5ms/格

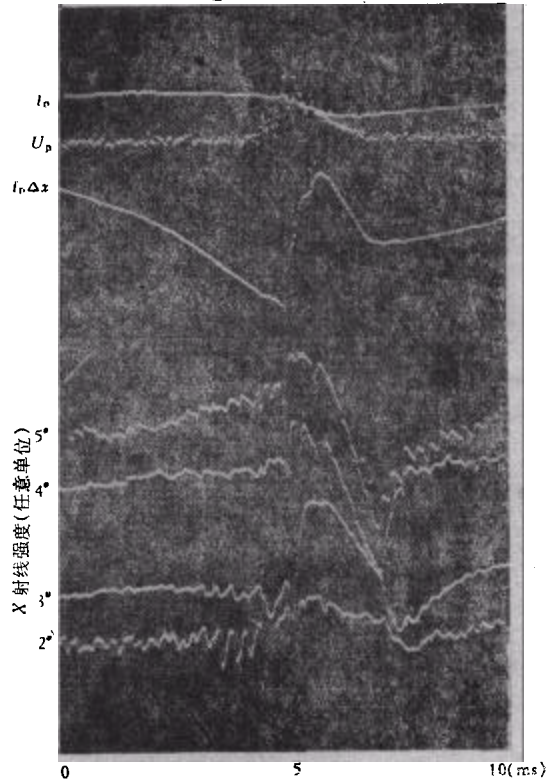


图 11 B型不稳定发生前后的参数变化;时标 1ms/格

ms, 等离子体的中心部分 (4#, 5# 探头信号) 已经开始逐渐下降。而外部 (3#, 2# 探头) 的软 X 射线信号有所增加。说明从中心向外的热传导已经在加速进行。2) 随着等离子体向外位移, 内破裂的锯齿信号越来越大。这是由于在位移中等离子体小半径不断收缩的结果。3) 不稳定发生时刻所有探头的软 X 射线信号迅速变小, 表明发生 B 型不稳定时, 等离子体由内到外同时冷却。4) 在不稳定结束之后, 中心道 (4#, 5#) 软 X 信号在 2ms 后达到极大值, 而边缘道 (2#, 3#) 的软 X 射线信号在中心道达到极大之后继续上升一段时间 (信号达到极大之后的衰减是由 RC 滤波器引起的) 表明, 不稳定结束之后首先加热等离子体的中心部位, 然后向外层扩散。

实验中得到耿秀敏、唐继辉、崔浜生、韩共和同志的大力支持, 波形记录仪由高凡、刘存虎同志研制提供, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] S. Von Geoler, W. Stodiek, N. R. Sauthoff, *Phys. Rev. Lett.*, **33**(1974), 1201.
- [2] N. R. Sauthoff, S. Von Geoler, W. Stodiek, *Nucl. Fusion*, **18**(1978), 1445.
- [3] 中国科学院物理所一〇四组、电工所四〇三组, *物理学报*, **29**(1980), 577.
- [4] 万柏坤、戚震枝、郑少白, *物理*, **11**(1982), 682.
- [5] G. L. Jahns, M. Soler, B. V. Waddell, J. D. Callen, H. R. Hicks, *Nucl. Fusion*, **18**(1978), 6090.
- [6] K. McGuire, D. C. Robinson, *Nucl. Fusion*, **19**(1979), 505.
- [7] T. F. R. Equipe, *Nucl. Fusion*, **18**(1977), 1283.
- [8] 王 龙、郑少白, *物理学报*, 待发表.
- [9] V. S. Makhovarov, V. D. Shafranov, *Nucl. Fusion*, **11**(1971), 605.
- [10] 薛明伦, *核聚变与等离子体物理*, **1**(1981), 28.

SOFT X-RAY EMISSION AND ITS FLUCTUATION IN CT-6B TOKAMAK

QI XIA-KHI ZHENG SHAO-BAI

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Soft X-ray diagnosis is an important method in the research of tokamak plasma instability. In this paper, we give the result of soft X-ray measurement in CT-6B tokamak by using Au(Si) surface barrier detector array, and present the spatial distributions of soft X-ray emission for various plasma instability in our device.