

HT-6B 托卡马克装置上的硬 X 射线起伏测量

王正民 李林忠
(中国科学院等离子体物理研究所)

1986年7月22日收到

提 要

用 NaI(Tl) 晶体闪烁探测器和金硅面垒型半导体探测器, 在 HT-6B 托卡马克装置上对 X 射线起伏进行了相关测量。观测了硬 X 射线发射和起伏锯齿波形。实验证实: 在 2—25 kHz 频区内的硬 X 射线起伏也是 MHD 扰动所致。

一、引 言

托卡马克装置放电时, 为击穿气体和进行欧姆加热需要有个感应电场, 等离子体中的电子被电场加速, 这样随着能量增大, 库仑碰撞频率降低, 部分电子会很快形成逃逸。这些逃逸电子在等离子体中与离子碰撞, 特别是当它们撞到限制器或容器壁上时, 产生韧致辐射会发射出能量相当高的硬 X 射线。测量这些硬 X 射线是研究逃逸电子行为物理过程的重要手段。

测量硬 X 射线, 目前大体可分成测量计数和记录波形两类。计数可得 X 射线发射强度和逃逸电子能量等方面的信息^[1,2]。近年来在等离子体诊断方面, 已普遍采用瞬时记录仪和计算机采集处理数据, 这样通过观测硬 X 射线起伏, 可研究逃逸电子在装置里的输运和等离子体中的 MHD 扰动等问题^[3,4]。

最近我们在 HF-6B 小型托卡马克装置上, 用 NaI(Tl) 晶体闪烁探测器和金硅面垒型半导体探测器同时测量了硬、软 X 射线起伏波形, 看到在它们的锯齿振荡之间是存在一定的内在联系。实验表明: 在 2—25 kHz 频区内, 硬 X 射线起伏也是 MHD 扰动所致。

二、实验方法

图 1 是实验布局示意图。I 是闪烁探测器, 它经铅屏蔽和准直对着限制器。准直器孔径 1 cm, 其轴线位于装置的大环赤道平面内。探头的中心线与等离子体的大环切向成 $\sim 10^\circ$ 角。探头距限制器 2m。实验测量的是逃逸电子碰到不锈钢限制器厚靶上产生韧致辐射发射的硬 X 射线, 探头输出电流正比于光子通量。图 1 中 II 是测量软 X 射线起伏的金硅面垒型半导体探测器阵列, 是由 13 只金层厚 $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、死层厚 $7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、有效

面积 50 mm^2 的探头构成。它们分两排装在同一圆弧上,探头之间中心距 2 cm ,探头距小孔成像窗口 21 cm ,距小环几何中心 42 cm 。

为了防止外界干扰,探头经准直对着成像窗口并和探测室电绝缘,在 $5 \times 8 \text{ mm}^2$ 小孔成像窗口上,用了上镀约 4000 \AA 铝、厚 $3 \mu\text{m}$ 的 formvar 膜做吸收膜。探测能区约 $0.9\text{--}13 \text{ keV}$ 。

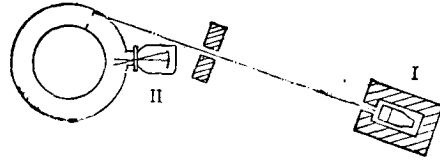


图1 实验布局示意图

上述软、硬 X 射线探测器的输出分别经放大和滤波,送数据采集系统通过计算机处理绘出有关波形。

三、实验观测

1. 硬 X 射线起伏波形

我们在装置经过放电清洗和运行参数为: 纵场强度 $B_t \sim 5\text{--}7 \text{ kG}$, 等离子体电流 $I_p \sim 25\text{--}30 \text{ kA}$, 电子密度 $\bar{n}_e \geq 0.9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 条件下,经多次放电得到一种典型的 X 射线起伏波形(见图 2)。图 2 中 a , b 分别为硬 X 射线积分信号和经滤波后的起伏波形, c 为半导体探测器阵列中心道的软 X 射线起伏波形。可见硬 X 射线的振荡更明显,且在 ~ 14.18 和 19.5 ms 处分别出现更大幅度的振荡。可依此把曲线分成三段来逐一分析: $10\text{--}14 \text{ ms}$ 段硬 X 射线振荡幅度时大时小,不过总趋势是增大,这相当于输运到跟限制器相交轨道上的逃逸电子密度受到扰动,且是逐渐增加; $14.5\text{--}17.5 \text{ ms}$ 时间内,振荡幅度虽有变化,但大致相当,它表明装置内的逃逸电子基本上是在周期性地变化;而在最后一段时间内,振荡幅度一直是在降低,这说明直到大破裂前逃逸电子都没有受到大的扰动。

图 3 是把图 2 中的硬 X 射线起伏在 $8\text{--}20 \text{ ms}$ 间分三段展开后的波形。第二条曲线

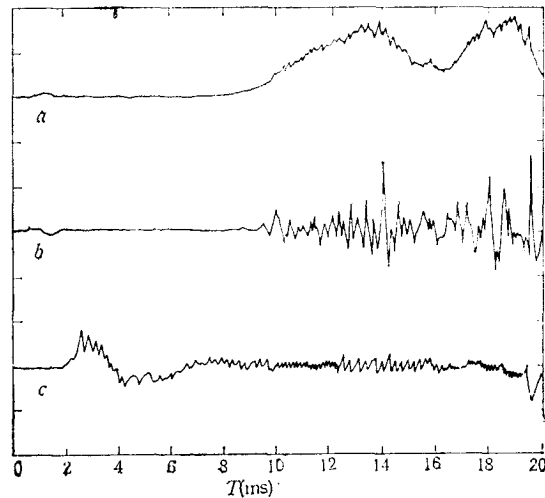


图 2 X 射线起伏波形

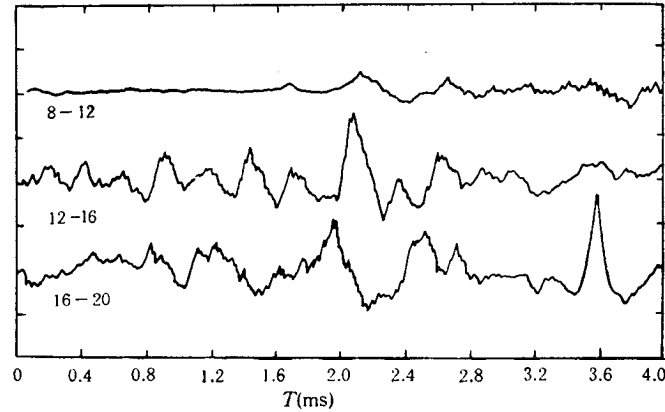


图3 硬X射线起伏波形展开图

上表现出存在一种非常典型的锯齿振荡,而在第一和第三条曲线波形上都迭加了很多高频小振荡,它表明运输到跟限制器相交轨道上的逃逸电子是受到了较高次 m 模的扰动.

2. 硬X射线锯齿振荡与内破裂

图4上hx,sx两条曲线分别是硬X射线和中心道软X射线同时测量10.4—14.4ms时间段内的波形.如图4所示,随着时间的发展,表示内破裂的典型锯齿振荡越来越明显.

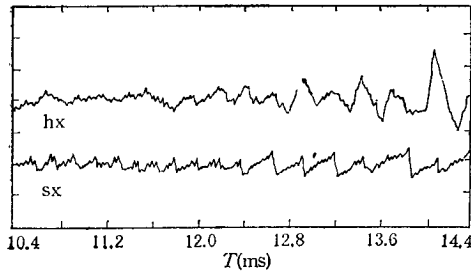


图4 X射线锯齿振荡

从软X射线起伏波形上可以清楚地看出,在 $m=0, n=0$ 锯齿上,迭加着典型的、不断增长的 $m=1$ 模振荡.当 $m=1$ 振荡发展到一定程度时,出现锯齿形内破裂.与软X射线波形一样,硬X射线的锯齿振荡上也迭加有高次 m 模的效应.

仔细分析11.2ms前后一段的硬X射线起伏波形,可以看到一种有趣的现象,就是硬X射线锯齿上升段是由两种不同斜率线段组成,如图5上标的 a, b 部分.图5是把图4上10.4—11.6ms线段的展宽,但随着时间的演化, a 部分逐渐发展成更大些的锯齿振荡,而 b 部分相对要小些.这可能是由于起初内破裂幅度小、周期短,一次内破裂对逃逸电子密度和运输影响不大,还不足以使硬X射线形成明显的锯齿振荡,但随着内破裂增强,影响变大,一次内破裂就会在硬X射线起伏波形上对应地出现一个明显的锯齿形振荡.

另外从图4那段典型的锯齿波形上看,硬X射线锯齿振荡是增长快、衰减慢,这和中心道软X射线起伏波形情况正好相反,且硬X射线的锯齿峰位,相对于软X射线的内破裂时间有 ~ 0.2 ms的延迟.这和Pulsator上的数值相同,但比PLT的约小0.5ms.由于HT-6B装置的小环半径跟Pulsator基本接近,而比PLT的小,这说明其延迟时间是随装置大小不同会有明显的变化.

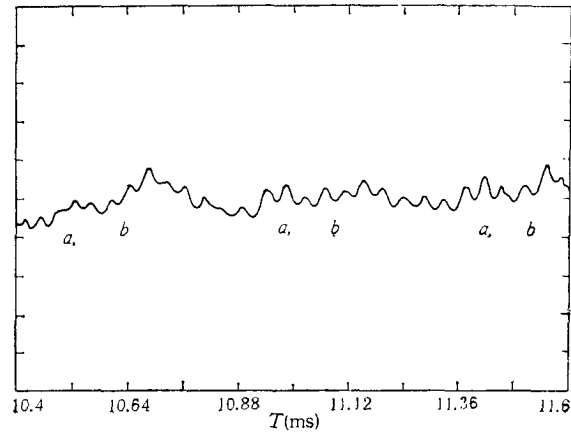


图5 一段时间内硬 X 射线波形展览

3. 硬 X 射线信号与 MHD 扰动

在图 4 的波形上已经表明, 内破裂频率 $\sim 2-5$ kHz 的锯齿上迭加有高次模的扰动

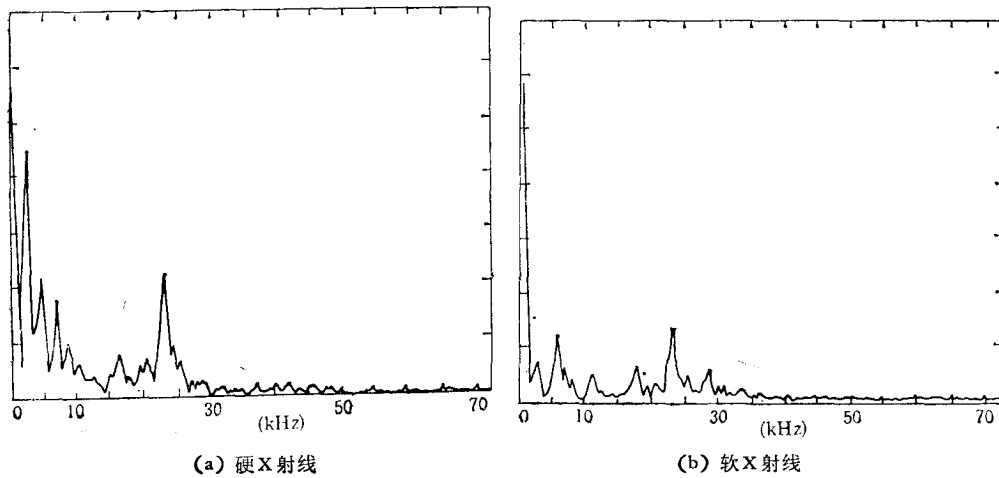
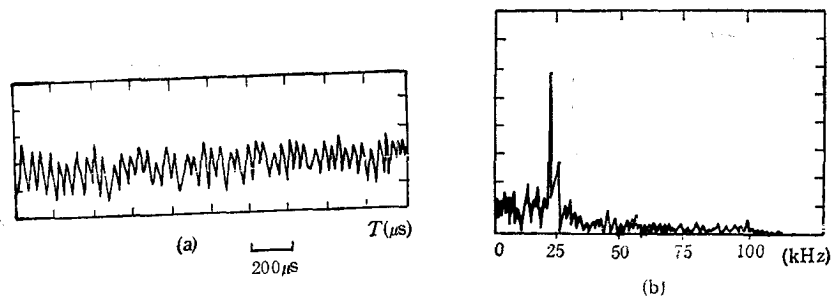


图6 X 射线频谱

图7 $m=2$ 磁线圈测量的扰动信号 (a) 和其相应的 FFT 频谱 (b)

效应. 图 6 所示是将 10—12 ms 时间内的硬、软 X 射线信号经快速傅里叶变换 (FFT) 后的频谱. 可见除了有稍低的锯齿振荡频率外, 特别有意义的是, 它们都有 23 kHz 的高频分量. 图 7 所示是 $m = 2$ 磁线圈测量的扰动信号和其相应的 FFT 频谱. 可见在 $m = 2$ 磁线圈测量的扰动频谱上, 主峰位频率也正是 23 kHz, 因此, 和软 X 射线起伏一样, 硬 X 射线在 2—25 kHz 频区的起伏也是 MHD 扰动所致.

四、结 论

1. 和软 X 射线一样, 硬 X 射线波形上也出现锯齿形振荡. 看到一种有趣的现象是: 在软 X 射线内破裂较小时, 硬 X 射线的小锯齿上升部分存在两种不同斜率的线段, 但随着内破裂的增大, 它们都逐渐形成更明显的锯齿波形.

2. 硬 X 射线较大锯齿的峰位相对于软 X 射线内破裂的延迟时间, 是随装置的小环半径增大而变大.

3. 和软 X 射线一样, 硬 X 射线在 2—25 kHz 频区内的起伏也是 MHD 扰动所致.

感谢陈佳驭、谢纪康、郭德全、秦品健及 HT-6B 装置组对本实验的支持.

参 考 文 献

- [1] H. E. Knoepfel *et al.*, ORNL-TM-3-022.
- [2] S. Von Goeler *et al.*, Proc. 3rd Int. Symp. Toroidal Plasma Confinement, Garching Paper B(25), (1973).
- [3] C. W. Barnes *et al.*, PPPL-1879, (1982).
- [4] C. W. Barnes *et al.*, PPPL-1916, (1982).

THE MEASUREMENTS OF HARD X-RAY FLUCTUATIONS IN THE HT-6B TOKAMAK

WANG ZHENG-MIN LI LIN-ZHONG

(*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei*)

ABSTRACT

NaI(Tl) scintillation detector and Si(Au) surface barrier semiconductor detector are used to measure X-ray fluctuations in the HT-6B Tokamak device. The hard X-ray emission and sawtooth oscillations have been observed. The experiment shows hard X-ray fluctuations are due to MHD disturbances in the frequency range of 2—25 kHz.

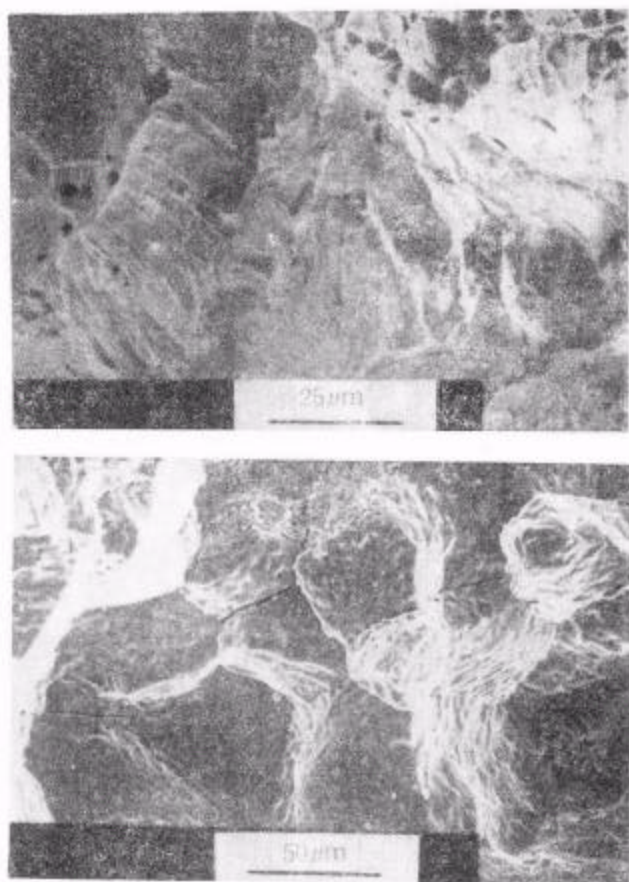


图 5

(a), (b) 分别表示图 2 和图 4 试样断口的扫描电子显微镜照片

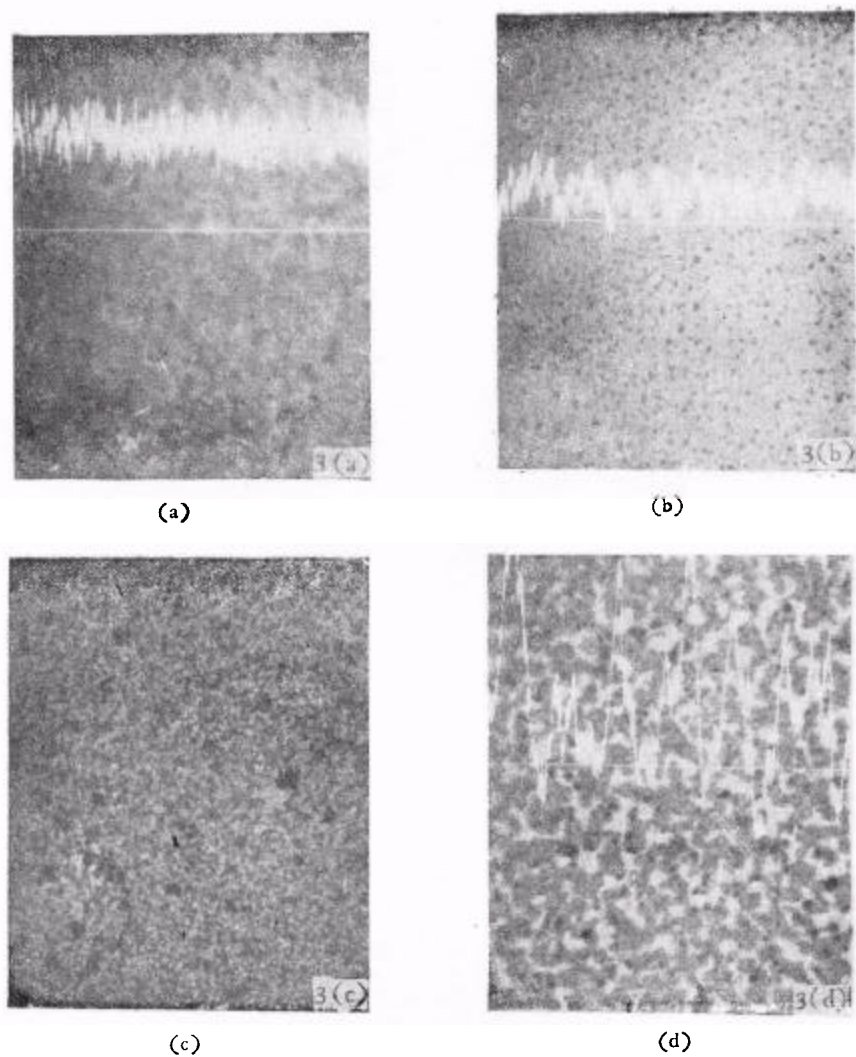


图3 200°C, 300°C, 400°C 和 500°C 真空退火 1 小时的 Ge/Ag 迭层膜扫描电子显微镜形貌图