

HT-7 超导托卡马克上 γ 辐射的初步研究

傅彦彰, 朱玉宝, 钟国强, 陈珏铨

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 尝试在 HT-7 托卡马克准稳态等离子体实验平台上, 对 γ 辐射能谱与通量进行测量与分析。实验测得了不同放电条件下的 γ 辐射能谱和通量的时间演化过程, 观测到了丰富的 γ 辐射行为。针对欧姆加热、低杂波、离子回旋波、离子伯恩斯坦波、长脉冲等不同放电条件下的 γ 辐射行为进行了研究, 结合其它相关诊断数据, 给出了初步的分析结果。

关键词: HT-7 托卡马克; γ 辐射; 能谱与通量测量

中图分类号: O242.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)02-0172-05

Primary Study on Gamma Radiation for HT-7 Superconducting Tokamak

FU Yan-zhang, ZHU Yu-bao, ZHONG Guo-qiang, CHEN Jue-quan

(*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: Gamma spectrum and fluence measurements on HT-7 superconducting Tokamak were described. Rich gamma radiation behaviors were observed under different plasma experimental conditions. The primary results from analyses of gamma spectrum and fluence data under Ohmic heating (OH), lower hybrid wave (LHW) heating, ion-cyclotron resonance frequency (ICRF) heating, ion Bernstein wave (IBW) and long pulse operation conditions are presented.

Key words: HT-7 Tokamak; gamma radiation; spectrum and fluence measurement

HT-7 超导托卡马克是我国正在运行中的中型准稳态磁约束聚变实验研究装置。该装置主要研究目标是获得并研究准稳态高温等离子体, 检验和发展与其相关的工程技术, 为未来稳态先进托卡马克聚变堆提供工程技术和物理基础^[1]。

高温等离子体中存在着大量的带电粒子, 它们之间有着各种复杂的相互作用, 所辐射出的电磁波具有广阔的频率范围。 γ 辐射测量是

对高温等离子体行为进行研究的一种手段^[2]。一般来讲, 托卡马克装置运行时产生的 γ 辐射主要来源于: 1) 氦、氖燃料离子与杂质离子的反应; 2) 高能逃逸电子与装置壁材料产生连续辐射; 3) 各种材料的原子核俘获中子的核反应。因此, 对 γ 辐射的测量有助于研究 H、D、He 等快离子、中子以及高能逃逸电子的行为。同时, γ 辐射的监测和防护也是高温等离子体

实验必须十分重视的一个问题。世界上许多大中型托卡马克装置(如 JET、JT-60U、FTU 等)都进行了 γ 辐射测量,取得了丰富的实验结果,为等离子体物理研究提供了参考^[3-5]。在 HT-7 中子实验研究的基础上^[6],开展 γ 辐射的实验研究很有必要。

1 测量系统的建立

实验使用 1 套带两个 NaI(Tl) 闪烁探测器的 γ 辐射测量系统,表 1 中列出了其主要参数和设置。

探测器位置示于图 1,探测器置于 HT-7 托卡马克装置的真空室窗口外面,均处于装置中平面上。其中,探测器 1 正对等离子体中心,为减少装置四周的本底辐射进入探测器以及防止系统饱和,在探测器的四周包围了 1 层铅,且在探测器面向等离子体的一面设置了准直。探测器 2 处于等离子体环的切向位置,与探测器 1 的夹角约为 30° ,不设屏蔽措施。

2 γ 辐射能谱测量

2.1 本底辐射能谱

HT-7 托卡马克装置实验运行期间是一复

杂的强辐射源,包含中子、X 和 γ 射线等。产生的中子会与各种材料发生反应而使物质活化。通过对实验平台本底的测量可了解材料被中子活化的情况。图 2 是在 HT-7 实验平台测得的本底 γ 辐射能谱,图中 1.46 MeV 能峰是由 ^{40}K 衰变辐射出来的自然界本底 γ 射线^[3]。HT-7 装置及其周边含有的主要元素有 H、D、B、C、O、Na、Al、Si、Ca、Ti、V、Cr、Fe、Ni、Cu、Zn、Mo、Pb 等。分析可知,装置及其周边的铁元素被中子活化而生成放射性元素锰是 γ 射线的主要来源(表 2)。

2.2 欧姆放电能谱

欧姆加热是建立及加热托卡马克等离子体的基本手段,也是托卡马克装置实验的一重要过程。研究欧姆加热产生的等离子体本身的性质在一些方面很有意义(如磁场位形特性、电流的维持、等离子体与器壁相互作用等)。图 3 是在欧姆加热时测量到的能谱。分析图 3 可知,在欧姆加热时, γ 辐射主要来源于高能逃逸电子与装置壁材料相互作用产生的连续辐射。同时,由于在欧姆加热时质子的能量达到了 $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$ 的反应阈能,因此,伴随该反应的能峰可从能谱上观察到^[7]。

表 1 γ 辐射测量系统的主要参数和设置

Table 1 Main parameters and settings of gamma radiation detecting system

NaI(Tl) 闪烁探测器	晶体尺寸	工作电压/V	探测能量/MeV	ADC 时钟频率/MHz	积分线性
#1	$\phi 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$	+700	0.1~3.3	80	< 0.1%
#2	$\phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$	+500	0.1~3.5	80	< 0.1%

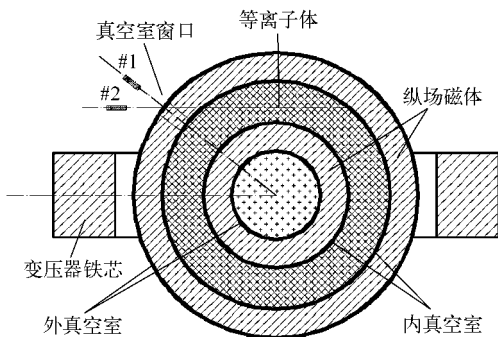


图 1 探测器的位置示意图
Fig. 1 Position of detectors

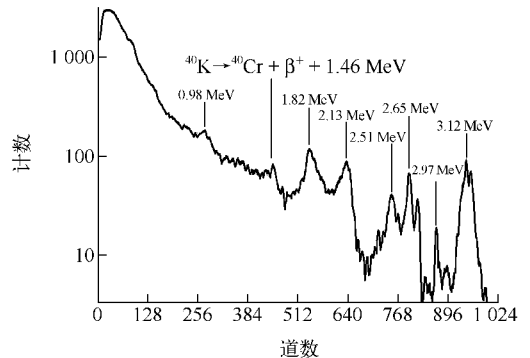


图 2 HT-7 平台本底 γ 辐射能谱
Fig. 2 Background gamma spectrum on HT-7 platform

表2 活化后各种衰变反应产生的本底 γ 射线
Table 2 Background gamma-ray from decay reactions

中子活化反应式	10^{28} 活化截面/ m^2	生成的放射性核素	半衰期/h	衰变类型	衰变子体	γ 射线能量/MeV
$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$	0.03	^{48}Sc	44	β^+	^{48}Ti	0.98
$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	0.11	^{56}Mn	2.58	β^+	^{56}Fe	1.81, 2.11, 2.52, 2.66, 2.96

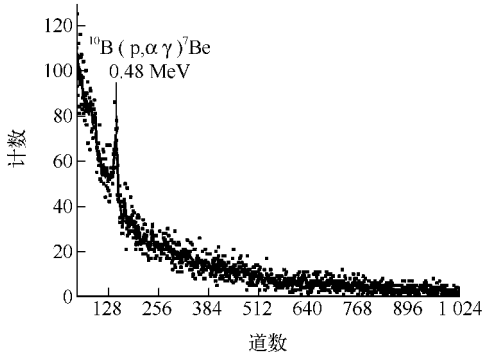


图3 欧姆放电 γ 辐射能谱

Fig. 3 Gamma spectrum under Ohmic heating

炮号:77176;等离子体电流:146 kA;
等离子体电子密度: $1.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

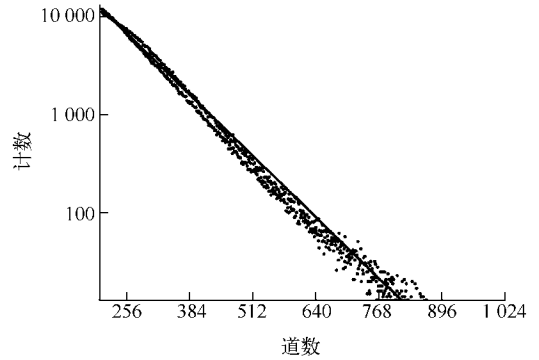


图4 低杂波加热长脉冲放电 γ 辐射能谱

Fig. 4 Gamma spectrum

under long pulse LHW condition
炮号:76382;等离子体电流:60 kA;
等离子体电子密度: $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$;
低杂波功率:150 kW

2.3 长脉冲低杂波加热放电能谱

在高温等离子体中,若不考虑线辐射,其连续辐射(包括韧致辐射和复合辐射)强度 $I(E)^{[2]}$ 可表示为:

$$I(E)dE = A(kT_e)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{E}{kT_e}} dE$$

式中: A 为与光子能量无关的系数; T_e 为高能逃逸电子温度; E 为 γ 射线能量。

根据这一公式拟合采集到的 γ 辐射数据,可得到高能逃逸电子的温度。图4是典型的长脉冲低杂波加热放电的 γ 辐射能谱。拟合结果可得高能逃逸电子能量为150.4 keV。当高能逃逸电子的能量在连续辐射过程中全部转化为辐射能量时,对应的 γ 辐射信号的脉冲幅度最高,这时可近似认为是高能逃逸电子的最大能量^[4]。对于炮号为77682的低杂波加热放电,高能逃逸电子的最大能量不低于2.3 MeV。

2.4 离子伯恩斯坦波加热放电能谱

离子伯恩斯坦波加热是托卡马克上一种辅助加热手段。离子伯恩斯坦波是离子回旋频率波上的一准静态电波,只有扰动电场,方向平行于波的传播方向,而扰动磁场几乎可忽略。相对其它射频波,离子伯恩斯坦波具有很好的可近性,波的能量可深达高温高密度等离子体的

芯部,能有效地加热离子和改善离子约束。

图5是在离子伯恩斯坦波加热放电条件下测量得到的 γ 能谱。0.76 MeV能峰是质子与第1壁上的钼反应产生的 γ 射线;1.91 MeV的能峰是质子与等离子体中的杂质碳发生的 $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ 反应而产生的,这说明离子伯恩斯坦波对质子加热很有效。HT-7放电期间同

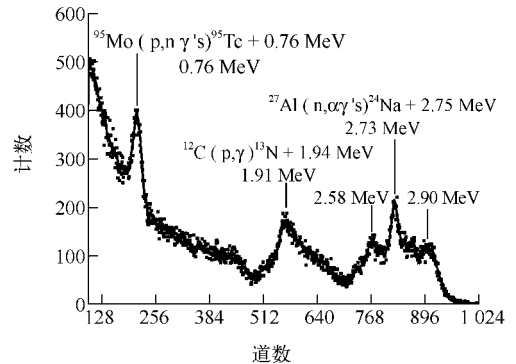


图5 离子伯恩斯坦波加热放电 γ 辐射能谱

Fig. 5 Gamma spectrum under IBW heating

炮号:77849—77857;等离子体电流:152 kA;
等离子体电子密度: $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$;
离子伯恩斯坦波功率:150 kW

时会产生大量的中子,反应 $^{27}\text{Al}(n, \alpha\gamma's)^{24}\text{Na}$ 是中子与装置材料中的铝发生的反应。

3 γ 辐射通量测量

对 HT-7 超导托卡马克装置上放电期间 γ 辐射随时间变化的测量通过多路数据时间分辨采集系统来实现。信号 ZZ6、ZZ7、ZZ3、IPA、NE3、PLHI、ICH1 分别对应 γ 探测器 1 计数信号、 γ 探测器 2 计数信号、 ^3He 中子探测器计数信号、等离子体电流、等离子体电子密度、低杂波功率、离子回旋波功率。

3.1 欧姆放电 γ 辐射通量

研究欧姆放电 γ 辐射通量可得到:1) 在等离子体电子密度基本不变的情况下,等离子体电流的变化未引起 γ 辐射强度的明显变化(图 6);2) 在等离子体电流基本不变的情况下,等离子体电子密度变大时, γ 辐射强度明显加强(图 7),因为高能逃逸电子与装置壁材料作用发生连续辐射的强度与电子密度相关,从而说明 γ 辐射强度与电子密度相关^[4]。

从图 6 和图 7 中还可观察到,在等离子体关断的瞬间会有很强的 γ 射线产生,这是因为有大量的高能逃逸电子和壁相互作用。

3.2 长脉冲低杂波加热 γ 辐射通量

通常情况下,等离子体加入低杂波后可改

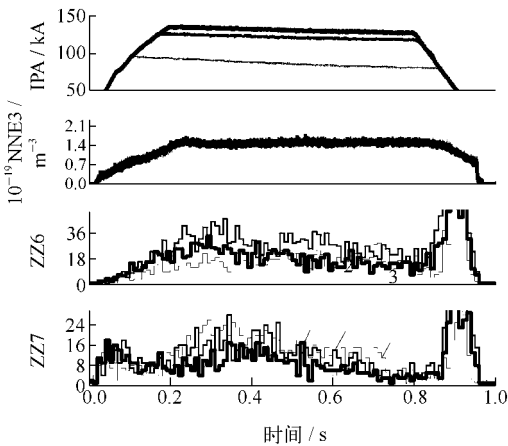


图 6 等离子体电子密度不变时 γ 辐射通量的时间演化

Fig. 6 Gamma fluence time evolution without NE3 changing

炮号:1——77598;2——77601;3——77605

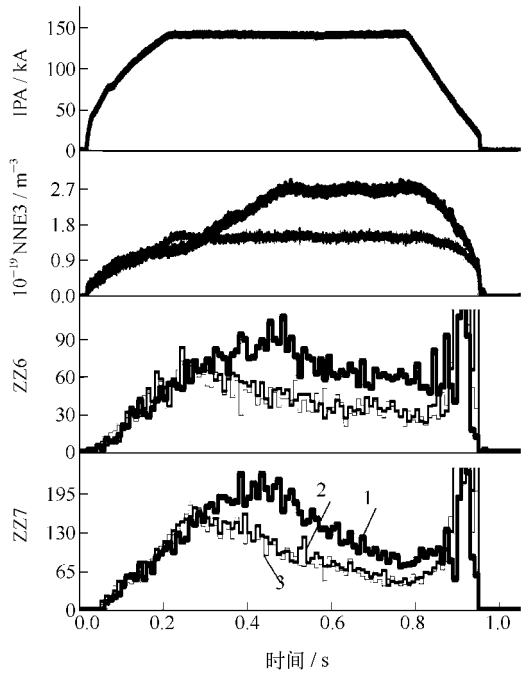


图 7 等离子体电流不变时 γ 辐射通量的时间演化

Fig. 7 Gamma fluence time evolution without IPA changing

炮号:1——77591;2——77612;3——77613

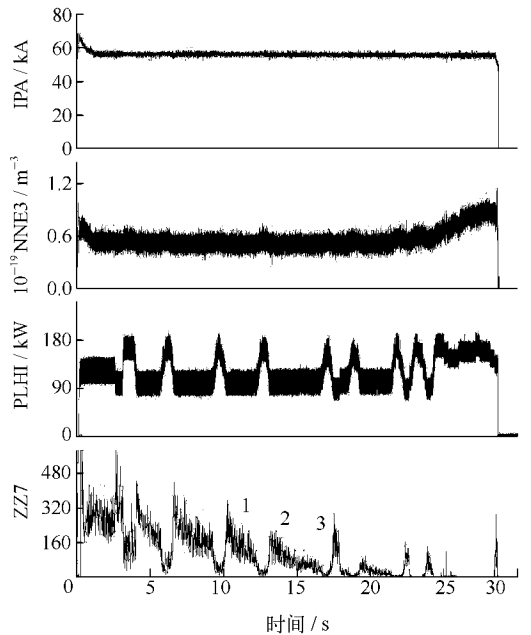


图 8 长脉冲低杂波加热放电 γ 辐射通量的时间演化

Fig. 8 Gamma fluence time evolution under long pulse LHW condition

炮号: 76367

善约束。图 8 是在低杂波功率出现明显变化而电子密度没有显著变化时 γ 辐射通量的时间演化图。当放电平稳后,改变低杂波功率,可看到在排除等离子体电子密度变化的影响以外, γ 辐射强度变化与低杂波功率变化有较大的关系。当低杂波功率突然增强时, γ 辐射减少,这说明加入低杂波可改善对等离子体的约束。

3.3 离子回旋波加热 γ 辐射通量

如图 9 所示,在加入离子回旋波后,中子信号加强而 γ 辐射信号却减弱,这是因为离子回旋波能把等离子体中的离子有效加热,从而产生高能离子,这些离子间以及离子与装置壁的材料发生反应,产生了大量的中子;在加入离子回旋波以前,放电不平稳,电子密度缓慢变化,产生的高能逃逸电子与各种壁材料发生连续辐射,产生了很强的 γ 辐射,当放电平稳后,高能逃逸电子减弱, γ 辐射随之减少。

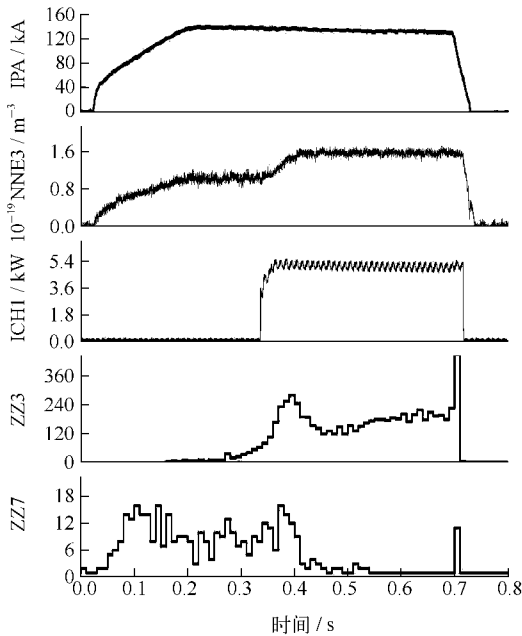


图 9 离子回旋波加热放电 γ 辐射通量的时间演化

Fig. 9 Gamma fluence time evolution
under ICRF heating
炮号: 77200

4 总结

在 HT-7 上进行的 γ 辐射测量结果显示, HT-7 在运行时是一复杂的强 γ 辐射源, γ 辐射主要来源于等离子体中燃料离子与各种杂质离子的核反应以及各种粒子间与装置壁材料的相互作用。通过 γ 辐射能谱的研究可了解装置运行时辐射出的中子对各种物质的活化行为和不同的加热手段对各种粒子加热的效果;同时通过 γ 辐射通量的测量可分析 HT-7 装置运行时各种丰富的物理现象。本项工作同时为辐射防护、装置运行与物理实验提供了参考,且为更深入的有关物理研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] LI Jiangang, WAN Baonian, LOU Jiarong, et al. Long pulse enhanced confinement discharges in the HT-7 superconducting Tokamak by ion Bernstein wave heating and lower hybrid wave current drive[J]. Physics of Plasmas, 2003, 10: 1 653-1 658.
- [2] 项志遴,俞昌旋. 高温等离子体诊断(上)[M]. 上海:科学技术出版社,1992:191-193.
- [3] KIPTILY V G, CECIL F E, JARVIS O N, et al. γ -ray diagnostics of energetic ions in JET[J]. Nucl Fusion, 2002, 42:999-1 007.
- [4] ESPOSITO B, BERTALOT L. A gamma-ray spectrometer system for fusion applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2002, A476:522-526.
- [5] KONDOH T, KUSAMA Y, KIMURA H, et al. Investigation of interaction between MeV-ions and first wall from neutron and γ -ray measurements in JT-60U[J]. Journal of Nuclear Materials, 1997, 241-243:564-568.
- [6] ZHU Yubao, CHEN Juequan, LI Guiming. Time resolved neutron flux diagnostics for quasi-steady-state operation study of HT-7 Tokamak [J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75:4 284-4 286.
- [7] 强亦忠. 常用核辐射数据手册[M]. 北京:原子能出版社,1990:271-272.