

HT-7 上氘等离子体放电时中子注量的测量与分析*

钟国强† 胡立群 朱玉宝 林士耀 陈珏铨 许平 段艳敏 卢洪伟

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥 230031)

(2008 年 1 月 3 日收到,2008 年 4 月 14 日收到修改稿)

利用三氟化硼(BF₃)和氦三(³He)正比计数管组成的快速时间分辨中子注量探测系统,对 HT-7 超导托卡马克上氘等离子体放电时光中子和聚变中子的产生机理进行研究.结合 γ 射线、硬 X 射线等相关诊断的实验结果,分析了纯欧姆放电和低杂波辅助加热放电时,中子注量信号随时间演化的典型特征.结果表明,HT-7 在投入大功率低杂波辅助加热等离子体放电时,能够产生数量可观的氘-氘(D-D)聚变中子.

关键词:中子注量,聚变中子,光中子,托卡马克

PACC:5270N,2960J,5255P

1. 引言

聚变能是 21 世纪一种重要的替代能源.与传统能源相比,它安全、清洁,更利于保护环境,减少温室气体排放.因此它将作为一种环保的,且几乎用之不竭的,新战略能源而被迅速发展.

可控热核聚变能的研究持续了近半个世纪,积累了宝贵的经验.近年来在一些大型的托卡马克磁约束聚变实验装置上(如 JET, JT-60U, TFTR)取得了令人鼓舞的研究成果.目前,国际热核聚变反应堆 ITER 项目已正式启动,国内全超导托卡马克装置 EAST(experimental advanced superconducting tokamak)已建成投入实验,它们将积极推动可控热核聚变研究朝自持燃烧、稳态运行方向迈进.随着等离子体温度不断提高,约束时间继续延长,聚变反应率迅速增大,聚变中子的数目也将急剧增多.对中子的产生、输运、防护以及与材料相互作用的研究将变得十分重要.

2. 装置简介

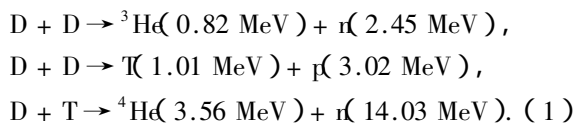
HT-7 是 20 世纪 90 年代我国继俄、法、日之后建成的世界上第 4 个超导托卡马克装置.它由装置主机、极向场电源及控制系统、低温系统、内外真空系

统、电机系统、磁体及技术诊断、总控系统、计算机采集及数据处理、低杂波电流驱动、离子回旋共振加热、电子回旋加热、等离子体诊断以及水冷等多个系统组成^[1].目前装置的典型放电运行参数见表 1^[2].

表 1 HT-7 超导托卡马克基本工程与物理参数

装置大半径: $R = 1.22$ m	装置小半径: $a = 0.27$ m
磁场强度: 2.5 T	等离子体电流: 260 kA
等离子体密度: $6.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	电子温度: $T_e = 1.5$ keV
离子温度: $T_i = 1.0$ keV	射频波总加热功率: 大于 1 MW
最长放电长度: 已达到 302 s	聚变中子产额: 约 8×10^8 n/(计算值)

装置放电运行期间中子主要来源于聚变反应和光核反应.由于其进行的是氘等离子体放电,因而发生的核聚变反应有



以 $D(d, n){}^3\text{He}$ 反应为主,它所产生的能量为 2.45 MeV 的中子数目占聚变中子总数的 98%—99.8%^[3].此外,高能 γ 射线、硬 X 射线也能与 D 核以及装置壁材料中的核素发生 $D(\gamma, n)H$, ${}^{12}\text{C}(\gamma, n){}^{11}\text{C}$, ${}^{96}\text{Mo}(\gamma, n){}^{95}\text{Mo}$ 等光核反应,产生多种能量的

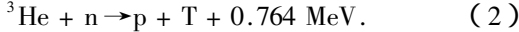
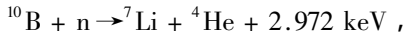
* 国家自然科学基金(批准号:10305013)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: gqzhong@ipp.ac.cn

光中子. 目前, HT-7 上等离子体的温度、密度等物理参数还不太高, 聚变反应率较低; 且存在 X 射线、 γ 射线等高能辐射, 光核反应发生率较高. 因而, 在纯欧姆放电的情况下, 光核反应产生的光中子通常会占据很大的份额.

3. 中子测量系统

HT-7 放电期间中子注量信号由 BF_3 正比计数管和 ^3He 正比计数管测得. BF_3 正比计数管 (ZJ1306) 由北京核仪器厂生产, 探测器灵敏区尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 348 \text{ mm}$, 充气压 500 mmHg (1 mmHg = $1.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$), 热中子灵敏度为 $25 \text{ c} \cdot \text{s}^{-1} \text{ per } \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 耐 γ 辐照量率 $1 \times 10^3 \mu\text{R/s}$; ^3He 正比计数管 (133NH30/5) 为美国 Canberra 公司生产, 探测器灵敏区尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 充气压 375 mmHg, 热中子灵敏度为 $133 \text{ c} \cdot \text{s}^{-1} \text{ per } \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 耐 γ 辐照量率 $6 \times 10^3 \mu\text{R/s}$. 这两类中子探测器, 是利用其活性物质 B 或 ^3He 与中子发生如下核反应:



产生 Li 核、 α 粒子或 T 核、质子, 通过收集这些高能带电粒子电离所产生的电荷, 来对中子进行测量.

装置放电时产生的中子绝大部分是能量较高的快中子, 而这两类计数管都只对热中子有很高的探测效率, 对快中子探测效率则较低. 因而, 在计数管外面均加装了一层聚乙烯慢化层, 用来将快中子慢化到热区, 提高探测器的探测效率^[4]. 改进后的 BF_3 中子探测器在其他研究所分别用 ^{252}Cf 源、加速器中子源 (2.5 MeV) 和 Am-Be 源进行了探测效率刻度, 其刻度结果分别为 6.65%、6.90%、5.22%; ^3He 中子探测器在本所采用 Am-Be 源做了较为粗略的刻度, 其探测效率约为 9.8%. 由于 HT-7 内、外真空室壁、冷屏及纵场线圈的阻隔加之真空室空间狭小等条件限制, 目前尚未用强 ^{252}Cf 源对装置器壁进行刻度. 因此, 暂不能从实验数据直接推算出聚变中子产额.

中子注量测量的实验数据由微机数据获取系统自动采集并保存, 该系统主要包括可编程 PCI-8554 多道分时计数卡、工控机、HT-7 数据存储库以及数据查询与绘图软件. 通过接收总控发出的触发信号, 系统可同时采集 10 路中子注量测量的计数信号, 并根据程序设置的采样周期时长 (实验中取 1 ms), 进行脉冲个数统计, 结果以 IZO 压缩格式分别保存于

HT-7 数据存储库. 每次等离子体放电结束后, 通过 GT-7 数据查询及绘图软件, 可立即从数据存储库下载当前实验结果进行分析. 测量系统结构示意图, 见图 1.

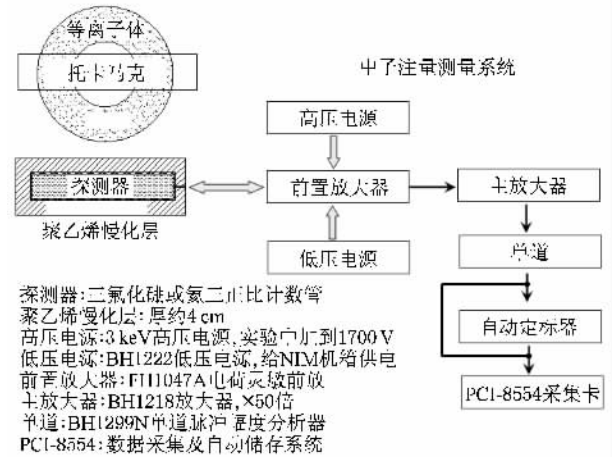


图 1 中子注量探测系统

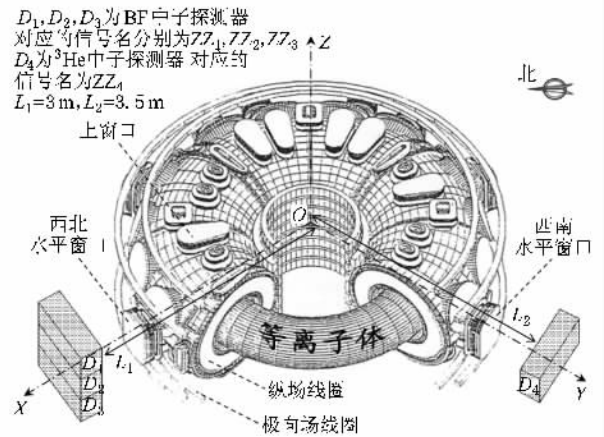


图 2 探测器安装布局

为减少高能硬 X 射线及 γ 射线本底对中子注量测量带来的影响, 前期台面实验采用 Am-Be 中子源与 10 mCi 级的 ^{137}Cs γ 源同时照射中子探测器, 调整探测系统的偏压、单道阈值以及前放放大倍数到合适的值, 使得 γ 射线附加的影响降低到不显著的水平. HT-7 放电实验中, 中子探测器外另加装上适当厚度的铅屏蔽层, 以削弱到达探测器的硬 X 射线及 γ 射线的强度. 结合硬 X 射线、 γ 射线等诊断的实验结果, 分析中子注量测量数据, 进一步降低 X 射线和 γ 射线带来的干扰.

实验中, 共使用了四个中子探测器, 其中三个 BF_3 正比计数管上下并排置于 HT-7 装置西北窗口

外 距离托卡马克中心约 3 m 处的中平面上 ;一个 ^3He 正比计数管置于西南窗口外 ,距离中心约 3.5 m 处的中平面上 ,如图 2 所示 .

4. 典型实验结果

4.1. 欧姆放电

欧姆放电(Ohmic discharge)是建立起托卡马克平衡位形等离子体的一种最基本的方式 ,被各装置所采用 .在纯欧姆加热放电时 ,由于极向场提供的伏秒数(Vs)限制 ,脉冲持续时间一般较短 ,且等离子体参数相对偏低 .HT-7 纯欧姆放电脉冲时长一般在 1 s 左右 ,中心离子温度通常小于 0.6 keV .根据三维体积积分计算可得到 D-D 聚变中子总产额^[4]

$$N = \pi n_{\text{D0}}^2 R_0 \int \int \sigma v_{\text{DD}} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{2\alpha} r \times \sqrt{R_0^2 + r^2 + 2R_0 r \cos\theta} dr d\theta, \quad (3)$$

$$\sigma v_{\text{DD}} = a_1 \left[1 + a_3 T_{\text{D0}}^\gamma \left(\frac{r^2}{a^2} + 1 \right)^{\beta\gamma} \right] \times T_{\text{D0}}^{-2/3} \left(\frac{r^2}{a^2} + 1 \right)^{-2\beta/3} \times \exp \left[- a_2 \left(- \frac{r^2}{a^2} + 1 \right)^{-\beta/3} / T_{\text{D0}}^{1/3} \right], \quad (4)$$

式中 σv_{DD} 为聚变反应率^[5,6] ; n_{D0} 为等离子体中心密度 ; T_{D0} 为等离子体中心温度 ; r 为极向截面上距

等离子体中心的距离 ; a 为等离子体极向小半径 ; R_0 为等离子体环向大半径 ; γ 取 0.95 ; α 与 β 为二项式分布指数 .

据计算 纯欧姆加热情况下 ,每次放电产生的聚变中子数低于 1×10^8 n/s ,安装探测器的位置 ,在不计装置器壁阻隔的情况下 ,中子注量率约为 $1 \text{ cps/cm}^2 \cdot \text{s}$.实验中 ,另受慢化效率及裸管的热中子灵敏度等因素的影响 ,探测器实际上很难观测到聚变中子 .图 3 为第 87876 炮 纯欧姆放电时的部分实验数据 .IPA 为等离子体电流信号 , NE_3 为主等离子体密度信号 , GM_1 为 γ 辐射强度信号 , $\text{ZZ}_1 - \text{ZZ}_3$ 分别为 D_1, D_2, D_3 探测器测量到的中子注量信号 .实验结果显示 ,该次放电过程中存在着很强的 γ 辐射 ,且中子注量测量信号也比较强 .按照公式计算 ,HT-7 在欧姆放电时聚变中子的产额应该很低 ,且难以被探测到 ,由此初步推断 ,这时候所测量到的中子不是来源于 D-D 聚变反应 ,而是来自光核反应 .

图 4(a)(b)(c)(d)(e) 是 γ 射线能谱测量得到的 ,不同能量段的 γ 射线强度随时间演化的结果 .放电前期 ,能量在 1—2 MeV 内的低能段 γ 射线强度增长迅速 ,5 MeV 以上高能成分增长缓慢 .600 ms 后随着等离子体电流进一步爬升 ,逃逸加剧 , γ 辐射的强度在各能段均出现了一个明显的增涨峰 .图 4(f) 为中子注量信号 ,与上图进行比较 ,其变化趋势与 5 MeV 以上的高能 γ 射线强度演化十分接近 .该实验结果与发生光核反应需要较高阈能的条件是相符的 ,从而间接表明了这时测量到的中子绝大部分是

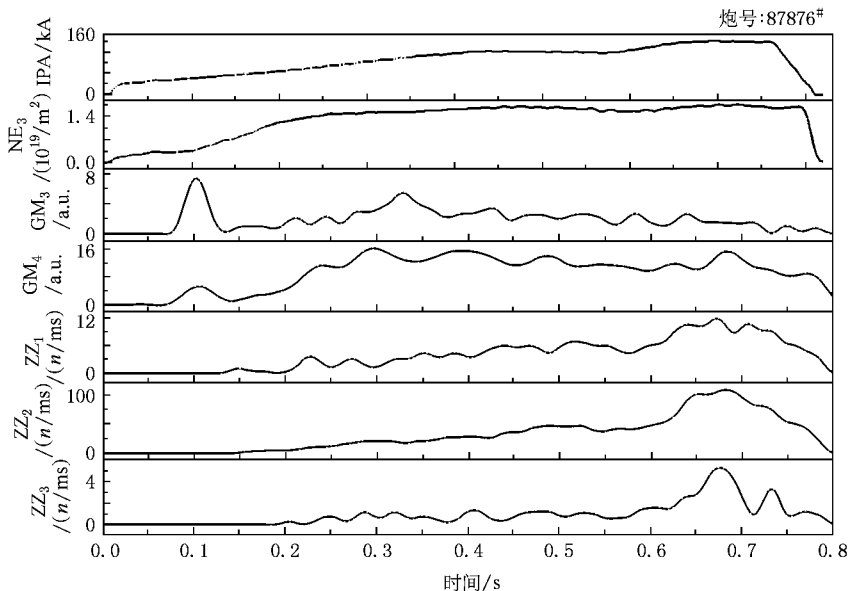


图 3 欧姆放电实验结果

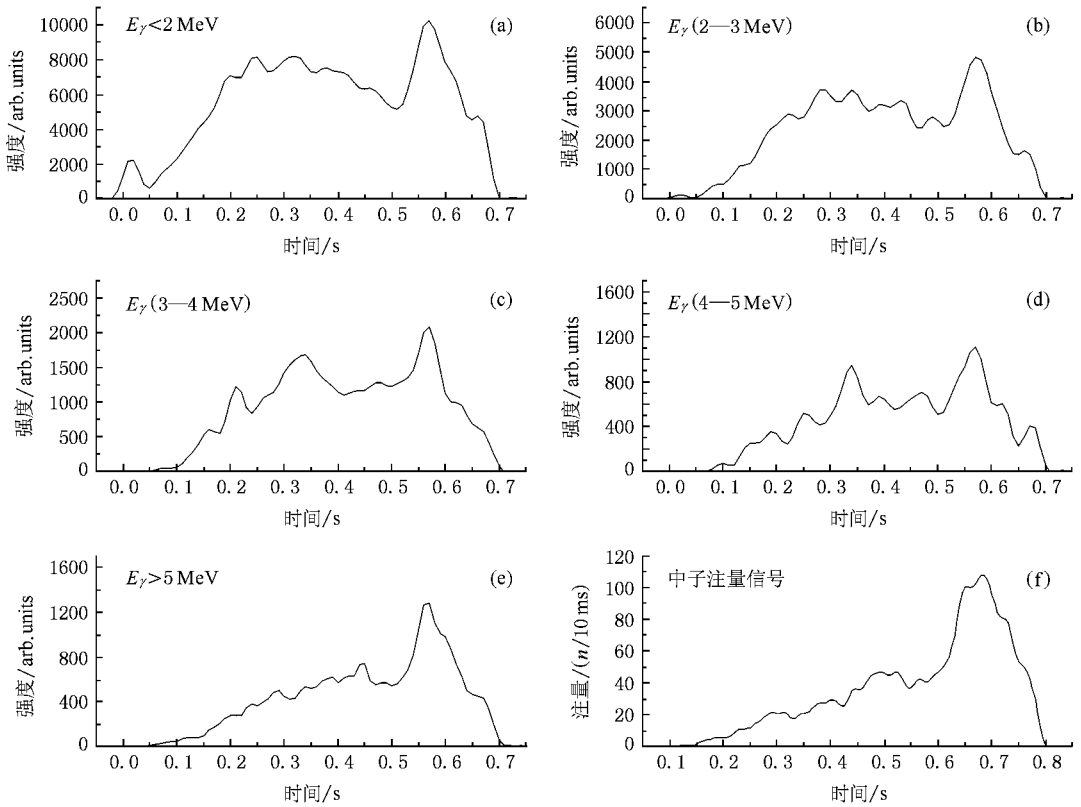


图 4 γ 射线强度的时间演化

光核反应产生的光中子。

4.2. 低杂波辅助加热放电

为了获得更长的放电脉冲和更高的等离子体参数, HT-7 上通常采用大功率的低杂波来驱动并加热

等离子体, 使得最长的放电脉冲超过了 300 s, 最高的离子温度到达了 1.2 keV. 在进行高参数等离子体放电实验时, 通常等离子体密度接近 $2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 离子温度达到 1 keV, 由(3)式计算得到的聚变中子产额将达到 $1.0 \times 10^9 \text{ n/s}$, 比纯欧姆加热下

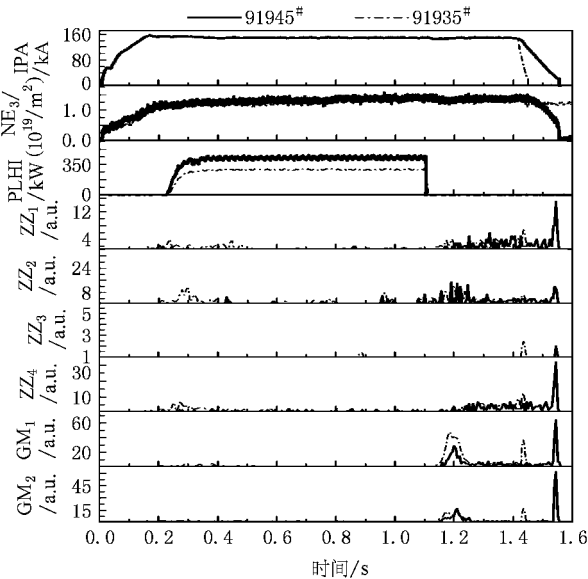


图 5 低功率低杂波加热等离子体放电

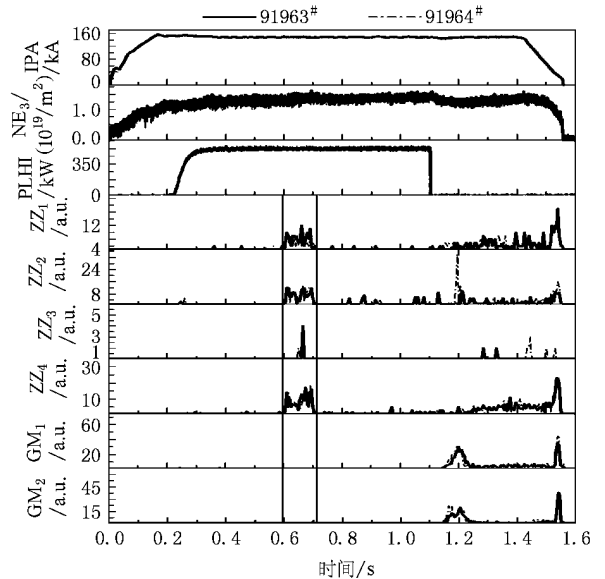


图 6 高功率低杂波加热等离子体放电

的产额高两个数量级.因而,在进行高功率波加热放电实验时,有可能探测到 D-D 反应产生的聚变中子.图 5、图 6 是低杂波加热功率调试实验时,等离子体电流在 160 kA,脉冲长度大约 1.5 s,四炮平稳的放电实验数据. PLHI 为低杂波功率随时间演化的信号, ZZ_1 — ZZ_4 均为中子注量信号, GM_1 , GM_2 为 γ 射线强度信号.图 5 中,第 91935 炮与第 91945 炮两次放电,等离子体电流、密度参数都十分接近,只有低杂波功率大小不同.从 γ 辐射信号上看,放电初期辐射开始增强,投入低杂波后辐射被抑制,波关断后高能 γ 射线的强度急剧增大.该现象表明,此时投入的低杂波起到了改善约束,减少逃逸的效果^[7].中子注量信号同 γ 辐射信号变化趋势较为类似,如前分析,此时探测到的中子绝大部分仍为光中子.

进一步提高低杂波加热功率,到第 91963, 91964 炮时,低杂波功率已接近 530 kW,等离子体电流、密度仍然保持不变.从四路中子注量信号上均可以看到,放电进行到 600 ms 时信号强度迅速增强,持续大约 100 ms 以后又快速减弱.此变化过程在两路 γ 辐射强度信号上均无表现,且该时间段内 γ 射线的强度十分微弱,几乎接近于零;由此可见,此时间段内

所探测到的中子并非来自光核反应.

结合其他诊断数据,对中子注量测量获得的结果进行深入分析.图 7 中 RA_4 为硬 X 射线强度信号, HA_{16} 为 $H\alpha$ 辐射强度信号, SXD_2 为软 X 射线强度信号, XUV_8 为类辐射量热信号.随着低杂波功率的升高,加波期间,硬 X 射线辐射的强度逐渐变弱;波关断后,逃逸迅速增涨,硬 X 射线辐射信号增强. SXD_2 , XUV_8 , $H\alpha$ 辐射强度,随着低杂波的投入,缓慢增强,大约 700 ms 以后,第 91963, 91964 两炮辐射强度增涨的趋势明显加快.在加波期间,除中子注量信号外,图上其他各类诊断信号,变化平稳、缓慢,无激增、锐减等情况.这些信号反映了,在加入大功率的低杂波后,等离子体约束改善^[8],逃逸得到控制,电子、离子的温度逐渐升高,在大约 600 ms 时,产生了较多的聚变中子.在维持了大约 100 ms 以后,由于低能 X 射线辐射及热辐射的增长,等离子体的温度降低, D-D 聚变反应率呈指数下降,聚变中子急剧减少.低杂波关断后,等离子体的参数迅速降低, γ 及硬 X 射线辐射强度快速增强,光核反应产生的光中子显著增多.

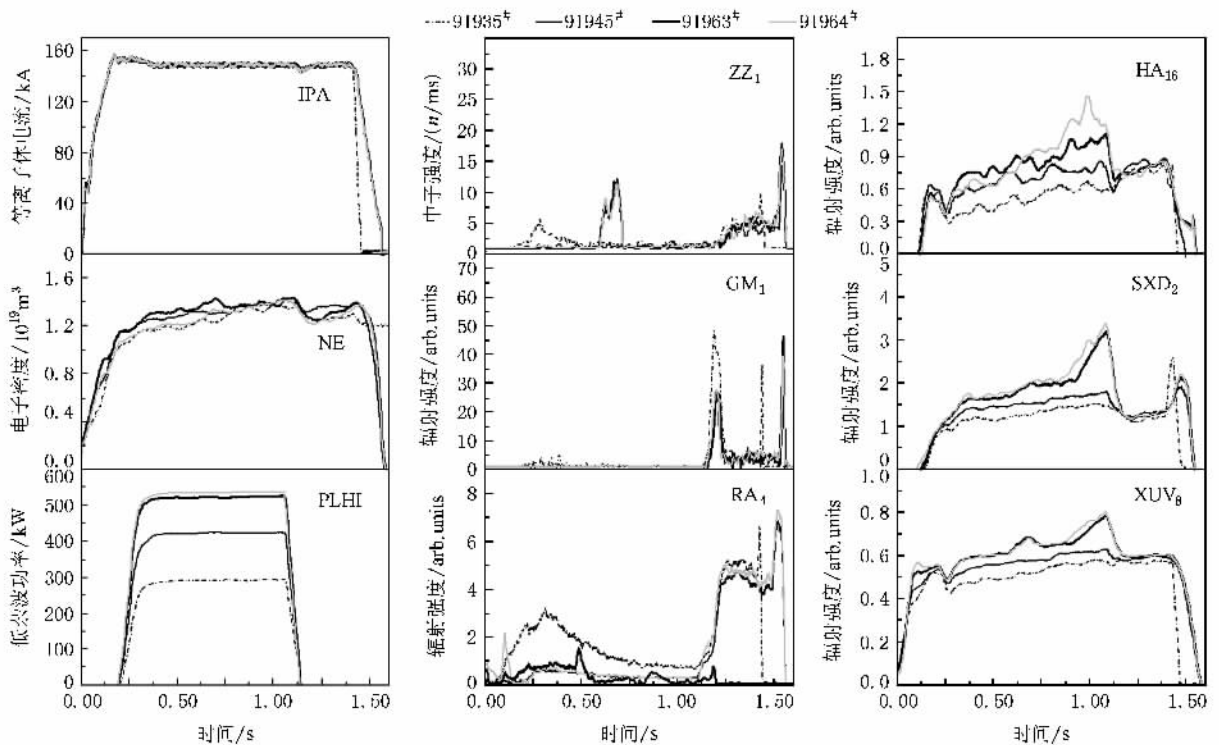


图 7 低杂波功率调试放电结果对比

5. 结 论

对典型放电实验结果对比分析,并结合公式推算得到,HT-7 托卡马克在进行纯欧姆及低功率射频波辅助加热放电时,产生并测量到的中子绝大部分为光中子,但是,在进行高功率射频波辅助加热,且约束条件较好的情况下,在短时间内会产生较多的聚变中子。

实验期间,对于光中子的测量,能够反映等离子体的约束状况、逃逸的程度以及高能射线辐射的强度等信息,对聚变中子注量的测量,能定性的分析等离子体的温度、密度参数和辅助加热的实际效果。HT-7 上中子注量的测量,使我们对托卡马克装置在进行聚变实验时,中子的产生机理有了基本认识,为新一代全超导托卡马克装置 EAST 上中子注量以及能量的测量奠定了基础。

- [1] Li J G ,Xie J K 2001 *Physics* **30** 328 (in Chinese)[李建刚、谢纪康 2001 物理 **30** 328]
- [2] Chen J Q ,Zhu Y B ,Zhang W 2006 *Radiation Protection* **26** 93 (in Chinese)[陈珏铨、朱玉宝、张 卫 2006 辐射防护 **26** 93]
- [3] Fu Y Z ,Zhu Y B ,Chen J Q 2006 *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering* **26** 28 (in Chinese)[傅彦彰、朱玉宝、陈珏铨 2006 核科学与工程 **26** 28]
- [4] Zhu Y B ,Chen J Q ,Li G M 2004 *Review of Scientific Instruments* **75** 4284
- [5] Shi B R 1999 *Magnetic Confinement Fusion Principles and Practice* (Beijing : Atomic Energy Press) p10 (in Chinese)[石秉仁 1999 磁约束聚变与实践 (北京·原子能出版社) 第 10 页]
- [6] Hively L M 1977 *Nuclear Fusion* **17** 873
- [7] Chen Z Y ,Wan B N ,Shi Y J ,Lin S Y ,Hu L Q ,M Asif 2005 *Phys . Lett . A* **344** 51
- [8] Huang R ,Deng C B ,Xie J K ,Zhong F C ,Wang S Y ,Zhang S Y , Zhao J Y 1994 *Acta Phys . Sin .* **43** 395 (in Chinese)[黄 荣、邓传宝、谢纪康、钟方川、汪舒娅、张守银、赵君煜 1994 物理学报 **43** 395]

Neutron flux measurement and analysis in the HT-7 deuterium plasma *

Zhong Guo-Qiang[†] Hu Li-Qun Zhu Yu-Bao Lin Shi-Yao Chen Jue-Quan Xu Ping Duan Yan-Min Lu Hong-Wei

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

(Received 3 January 2008 ; revised manuscript received 14 April 2008)

Abstract

Fusion neutron and photon neutron producing behavior in the deuterium plasma discharge have been studied on HT-7 superconductive tokamak device by BF_3 and ^3He proportional ionization chamber implementing the fast time respond neutron flux measurement system. Typical time resolved neutron flux signals have been analyzed in connection with gamma and hard X-ray diagnostic data in the cases of ohmic discharge and lower hybrid wave discharge. Data analysis show that many neutrons are produced by D-D fusion reaction when high-power lower hybrid wave was employed to heat the plasma.

Keywords : neutron flux , fusion neutron , photon neutron , tokamak

PACC : 5270N , 2960J , 5255P

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10305013).

[†] Corresponding author. E-mail : gqzhong@ipp.ac.cn