

## HT-7 上射频波加热时中子辐射行为的研究\*

钟国强<sup>1)2)†</sup> 胡立群<sup>2)</sup> 王相綦<sup>1)</sup> 李晓玲<sup>2)</sup> 林士耀<sup>2)</sup> 许平<sup>2)</sup>  
段艳敏<sup>2)</sup> 毛松涛<sup>2)</sup> 张继忠<sup>2)</sup>

1) (中国科学技术大学核科学技术学院, 合肥 230029)

2) (中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2010年1月8日收到; 2010年3月3日收到修改稿)

HT-7 超导托卡马克进行 DD 等离子体放电时, 中子的辐射与辅助加热射频波的类型 (LHW 加热、ICRF 加热) 及功率密切相关. 利用  $\text{BF}_3$  与  $^3\text{He}$  正比计数管组成的快速时间分辨中子注量监测系统, 研究了不同类型的射频加热对于中子产生机理及高能离子形成的影响. LHW 加热功率较低时, 易形成逃逸, 产生大量的光中子. 特定频率的 ICRF (27 MHz, 24 MHz) 加热时, 聚变中子所占份额以及总的中子产额均随波功率的增大而显著增殖.

**关键词:** 射频加热, 中子, 托卡马克

**PACS:** 29.40.-n, 52.70.Nc, 52.55.Fa

## 1. 引言

可控热核聚变要实现聚变点火, 其最重要的一项任务是要把等离子体加热到 10 keV 以上, 使得聚变核燃料离子能够克服核间库仑斥力, 发生聚变反应. 目前, 托卡马克磁约束聚变研究装置上, 加热等离子体的主要手段包括欧姆加热, 大功率射频波加热以及中性粒子束注入加热. 欧姆加热是托卡马克装置自身固有的一种加热方式, 但受加热场线圈提供的磁通变化能力 (伏秒数), 以及等离子体电阻率随温度升高而降低等因素的限制, 单纯的欧姆加热很难将核燃料离子加热到 1 keV 以上. 要进一步提升等离子体的温度, 就必须依靠外部的辅助加热<sup>[1]</sup>. 高参数聚变等离子体基本特征参数以及物理行为的研究, 对于 ITER 以及未来聚变商用堆的建设具有重要意义. 目前, 已成为聚变界研究的热点<sup>[2]</sup>. 中子作为聚变反应的一种直接产物, 担负着聚变能输出的重任, 其输运行为是我们研究的一个重点. 此外, 由于中子不带电荷, 不受磁场约束, 能轻易的从聚变等离子体中心区辐射出来. 通过对这些中子辐射行为的研究, 能够为高参数聚变等离子体的研究提供一条重要途径.

## 2. 背景介绍

HT-7 是上世纪 90 年代我国继俄、法、日之后, 建成的第四个超导托卡马克磁约束聚变研究装置. 主要由装置主机、电源、内外真空、水冷、低温、总控、数据采集、射频波驱动及加热、等离子体诊断等多个系统组成. 装置的大半径 1.22 m、小半径 0.27 m、最高磁场 2.5 T; 最大等离子体电流 260 kA、密度  $6.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、电子温度 1.5 keV、离子温度 1.0 keV; 射频加热总功率超过 1.5 MW, 最长放电脉冲时间大于 6.5 min.

HT-7 主要采用大功率的射频波来进行辅助加热, 其加热方式包括, 2.45 GHz 低混杂波 (lower hybrid waves) 加热以及 24—56 MHz 的离子回旋共振 (ion cyclotron range of frequencies) 加热. LHW 具有很好的电流驱动效果, 是 HT-7 维持长脉冲等离子体和改善等离子体约束的重要手段<sup>[3]</sup>. 此外, LHW 对于电子具有明显的加热效果. HT-7 上采用 ICRF 主要用来进行离子加热. 不同频率的 ICRF, 对应着不同的加热模式. 20—30 MHz 的 ICRF 主要以模转换形式加热, 30—50 MHz 直接加热电子, 50—60 MHz 时以谐波加热为主.

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 10935004) 和国家自然科学基金 (批准号: 10775041, 10675124) 资助的课题.

† E-mail: gqzhong@ipp.ac.cn

### 3. 中子诊断系统

HT-7 上的中子诊断系统使用的探测器主要是高灵敏度的  $\text{BF}_3$  与  $^3\text{He}$  正比计数管,其性能参数见表 1.

由于等离子体放电时产生的聚变中子能量较

高,为了提高探测器对高能中子的探测效率,在正比计数管外加装了一层高密度聚乙烯(约 5 cm 厚)作为快中子慢化体.用于注量测量的  $^3\text{He}$  与  $\text{BF}_3$  探测器,用 Am-Be 中子源进行台面标定,其探测效率分别为 9.8% 与 5.2%<sup>[4]</sup>. 由于 HT-7 上尚未采用高强度的  $^{252}\text{Cf}$  源在装置内部做原位标定,因而实验上还不能直接给出中子辐射的绝对强度.

表 1  $\text{BF}_3$  与  $^3\text{He}$  正比计数管的主要性能参数

活性物质	型号	外径 /mm	灵敏长度 /mm	充气压力 /cmHg	热中子灵敏度 /cps/nV	抗 $\gamma$ 射线能力 / (mR/s)
$\text{BF}_3$	ZJ1307	38	348	50	15	1
$^3\text{He}$	133NH30/5	30	300	378	133	6

$\text{BF}_3$  与  $^3\text{He}$  正比计数管对  $\gamma$  (或硬 X) 射线较敏感,为确保中子测量数据的有效,信号处理电路除了采用脉冲幅度甄别外,还结合了脉冲幅度谱采集.可以根据脉冲幅度谱测量的结果,来确定一个合适的单道甄别阈值.确保快速时间分辨计数卡(时间分辨为 5 ms)采集的信号能有效的排出  $\gamma$  (或硬 X) 射线的干扰,并尽可能减少中子计数的丢失.

实验数据后处理时,可以根据测量的脉冲幅度谱来判断该次放电  $\text{BF}_3$  与  $^3\text{He}$  正比计数管受  $\gamma$  射线影响的程度,从而对原始测量数据进行筛选.此外,根据脉冲幅度谱形,可以更灵活准确的划定甄别阈值,选取该阈值以上计数道上的计数进行叠加统计,能更准确的获得该时段内探测器测量到的中子数.中子诊断系统的结构示意图及探测器布置见图 1.

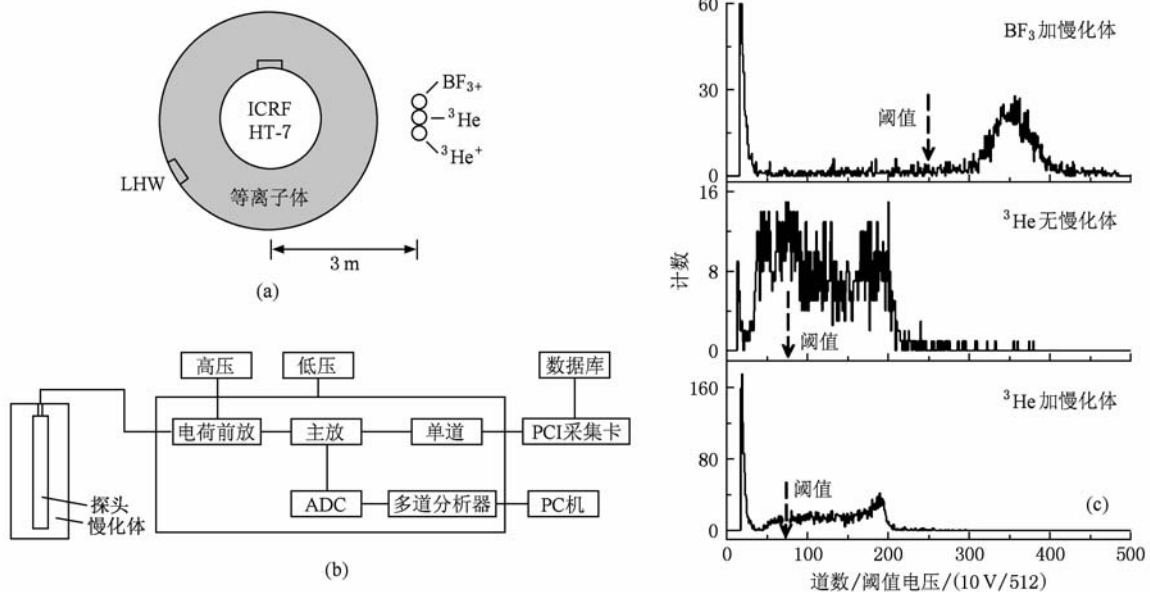


图 1 HT-7 上中子诊断系统结构示意图 (a) 探测器布局; (b) 测量系统结构; (c) 注量测量阈值选取

### 4. 中子产额的计算

氘等离子体放电时, DD 聚变中子产额为<sup>[5]</sup>

$$n_{\text{DD}}(t) = \int_{V_p} R(T_i(r,t), n_D(r,t)) dV_p, \quad (1)$$

$$R(T_i(r,t), n_D(r,t)) = \frac{1}{2} n_D^2 \langle \sigma v_{\text{DD}} \rangle,$$

$$dV_p = r(R_0 - r \cos \theta) d\theta d\varphi dr.$$

式中  $R$  是单位体积等离子体中每秒的聚变中子产额;  $R_0, r, \theta, \varphi$  分别是托卡马克装置的大半径、小半径、极向角、环向角;  $T_i, n_D$  分别是氘等离子体的温度和密

度. 根据 Bosch 与 Hale 的推导, 聚变反应概率与离子温度的函数为<sup>[6]</sup>

$$\langle \sigma v_{DD} \rangle = c_1 \theta (\xi / \mu_{red} c^2 T_i^3)^{1/2} \exp(-3\xi),$$

$$\theta = T_i \left( 1 - \frac{T_i (c_2 + T_i (c_4 + T_i c_6))}{1 + T_i (c_3 + T_i (c_5 + T_i c_7))} \right)^{-1},$$

$$\xi = (B_G^2 / 4\theta)^{1/3}. \quad (2)$$

式中的系数见表 2.

表 2 核反应概率公式中的系数

系数	核反应类型	
	D(d,p)T	D(d,n) <sup>3</sup> He
$B_G/\text{keV}^{1/2}$	31.3970	31.3970
$\mu_{red}/\text{keV}$	937814	937814
$C_1$	$5.65718 \times 10^{-12}$	$5.43360 \times 10^{-12}$
$C_2$	$3.41267 \times 10^{-3}$	$5.85778 \times 10^{-3}$
$C_3$	$1.99167 \times 10^{-3}$	$7.68222 \times 10^{-3}$
$C_4$	0.0	0.0
$C_5$	$1.05060 \times 10^{-5}$	$-2.96400 \times 10^{-6}$
$C_6$	0.0	0.0
$C_7$	0.0	0.0
$T_i$ 范围/keV	0.2—100	0.2—100
误差/%	0.35	0.3

结合 HT-7 托卡马克装置的工程参数, 计算了密度为  $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , D 等离子体放电时, 不同离子温度对应的 DD 聚变中子产额, 结果见图 2.

此外, 根据我们探测器测量的中子注量  $\phi_n(t)$ ,

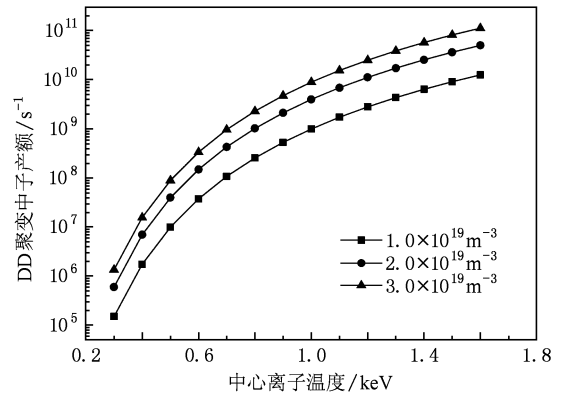


图 2 HT-7 上 DD 聚变中子产额的计算结果

以及探头的标定系数, 在忽略装置器壁的屏蔽及散射的情况下, 可以估算总的中子产额  $n_{tal}(t)$ <sup>[7]</sup> 为

$$n_{tal}(t) = \phi_n(t) / \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{8\pi^2 S^2(\beta)} d\beta,$$

$$S^2 = (R_0 + d)^2 + R_0^2 - 2(R_0 + d)R_0 \cos\beta. \quad (3)$$

上式中,  $R_0$  是装置的大半径,  $d$  是探测器到 HT-7 托卡马克装置中心轴线的距离.

## 5. 实验结果及分析

### 5.1. LHW 加热

HT-7 上加 LHW 的等离子体放电, 当波的功率较低时 (低于 250 kW), 很容易形成类似于 #106722 炮, 逃逸较严重的放电. 图 3 中, #106722 炮等离子

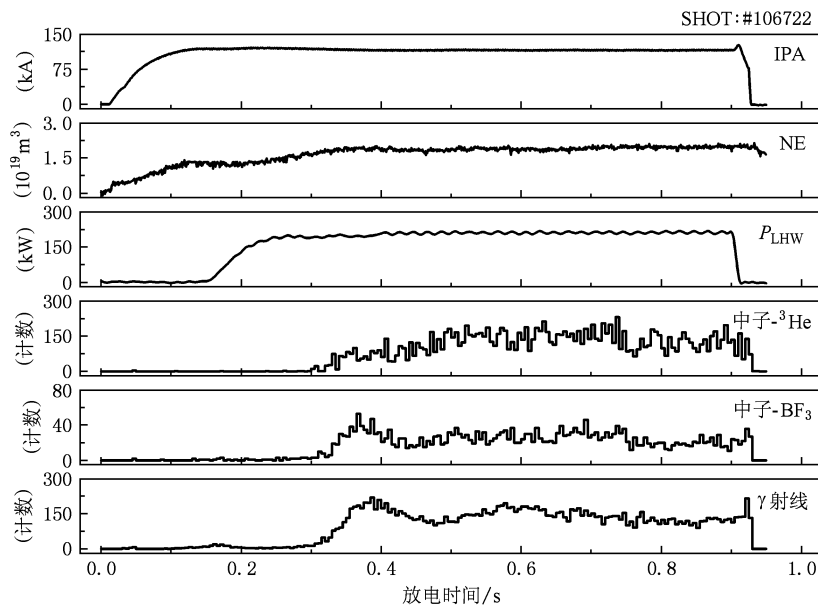


图 3 低功率 LHW 加热时中子注量的演化

体电流  $I_{PA} \sim 120$  kA, 中心道的电子弦平均密度  $n_e \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , LHW 实际入射功率  $P_{LHW} \sim 200$  kW. 放电进行到 300 ms 时, 中子以及  $\gamma$  射线辐射均迅速增强, 且中子辐射强度随时间变化的趋势同  $\gamma$  射线相似. 由于 LHW 功率较低, 驱动电流能力较弱, 密度升高 ( $n_e: 1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \rightarrow 1.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ) 后环电压 ( $V_f: 0.8 \text{ V} \rightarrow 1.3 \text{ V}$ ) 也升高. 环电压加速 LHW 驱动起来的快电子<sup>[8]</sup>, 形成逃逸电子并产生很强的  $\gamma$  (或硬 X) 射线. 高能射线通过光核反应, 产生了大量的光中子<sup>[9]</sup>. 此时, 中心离子温度取 0.6 keV, 根据(1), (3) 式进行估算得到 DD 聚变中子产额为  $8.3 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ , 总的中子产额为  $6.7 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ . 在不计

DT 聚变中子的情况下, 光中子产额约为  $6.6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$  (总的中子产额减去 DD 聚变中子产额), 占中子总产额的 98%.

提高 LHW 的功率以及等离子体的密度, 逃逸将会被抑制,  $\gamma$  (或硬 X) 射线辐射强度大幅降低. 图 4 中 #104882 炮, 等离子体电流  $I_{PA} \sim 120$  kA, 中心电子密度  $n_e \sim 3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , LHW 功率  $P_{LHW} \sim 400$  kW. 加 LHW 期间,  $\gamma$  射线强度降低, 中子注量信号却存在小幅度的上涨. 中心离子温度取 0.65 keV 进行估算, DD 聚变中子产额为  $4.5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ , 总的中子产额为  $5.7 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ . 此时, DD 聚变中子占主导, 约为 79%. 聚变中子的产额较低, 略高于相同条件下的欧姆放电.

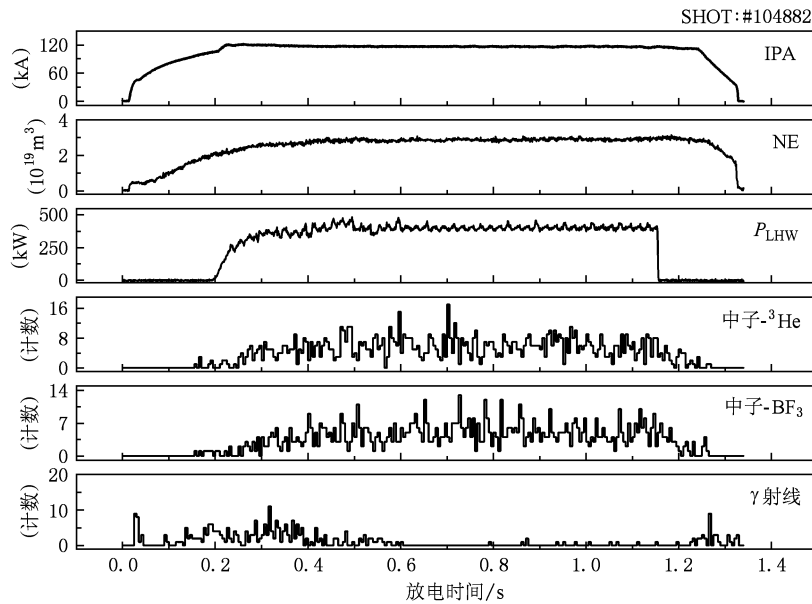


图4 较高功率 LHW 加热时中子注量的演化

## 5.2. ICRF 加热

HT-7 上 27MHz 的 ICRF 加热实验时, 当入射波的功率大于 300 kW, 反射低于 10%, 中子注量信号在加 ICRF 期间通常会明显增强. 图 5 中 #109890 炮为 27MHz 的 ICRF 加热时的放电, #109888 为参考对比的欧姆放电. 两次放电的等离子体电流  $I_{PA} \sim 160$  kA, 最高的中心电子密度为  $n_e \sim 3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ . ICRF 实际注入功率  $P_{ICRF} \sim 570$  kW. 参考炮采用主动充气, 使电子密度与加 ICRF 加热时相同, 以抵消加 ICRF 时密度上升对中子产额的贡献. 两次放电  $\gamma$  (或硬 X) 射线强度均很弱, 光中子的贡献以及  $\gamma$  射线本底的影响均较小. 中心离子温度取 0.85

keV, 进行估算得到: DD 聚变中子产额为  $3.1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ , 总的中子产额为  $3.3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ , 光中子约占 6%. 实验结果对比显示, #109890 炮加 ICRF 期间, 中子注量显著高于相同条件下的欧姆放电, 且软 X 射线辐射强度以及内能均增强. 对实验测量的中子计数进行统计, #109890 炮加 ICRF 时的中子注量比欧姆放电时大约强 5 倍. 在忽略光中子且离子速度仍为 Maxwell 分布的情况下, 依据聚变中子产额与离子温度的关系进行粗略估算, #109890 炮 ICRF 加热期间, 离子温度大约升高了 25%.

HT-7 托卡马克上, 相同条件下 24 MHz 的 ICRF 比 27 MHz 的 ICRF 加热时中子注量增涨的更明显. 由此反映, 24 MHz 的 ICRF 加热效果更显著. 图 6 中

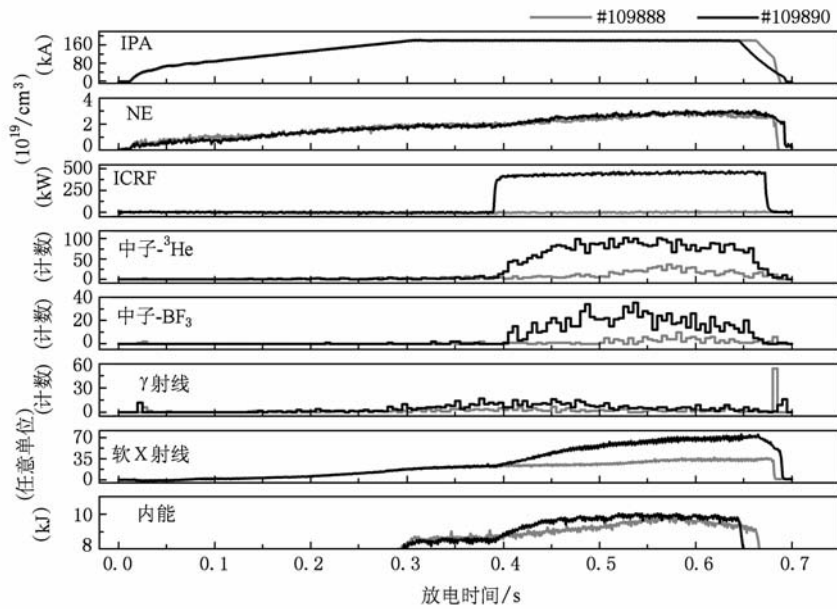


图5 27 MHz 的 ICRF 加热与纯欧姆放电时的对比

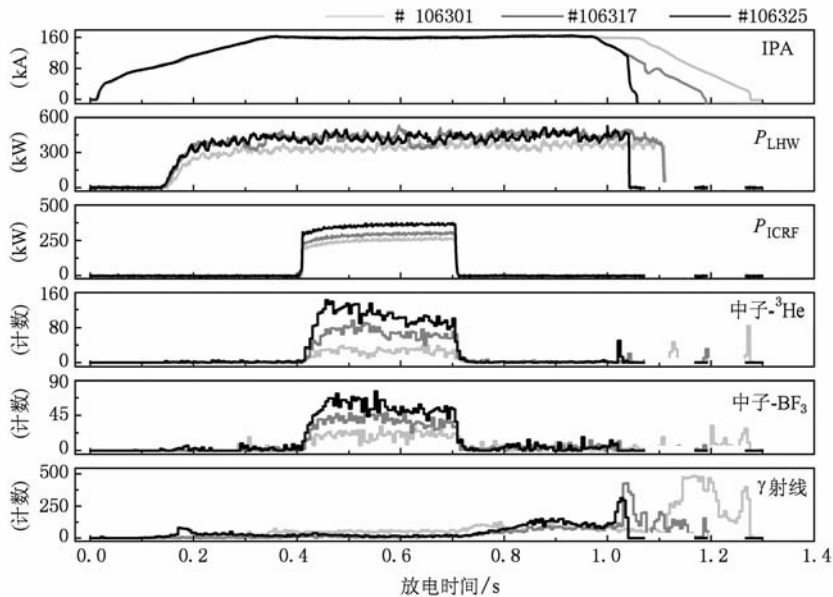


图6 24MHz ICRF 功率扫描

选取的三次放电, 等离子体电流  $I_{PA} \sim 160$  kA、电子密度  $n_e \sim 2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、低杂波功率  $P_{LHW} \sim 400$  kW, ICRF 注入功率分别为 220 kW, 330 kW, 460 kW. ICRF 加热期间,  $\gamma$  (或硬 X) 射线强度均很弱, 对中子注量测量造成的影响小. 此外, LHW 加热功率为 400 kW 左右时, 对中子测量结果带来的贡献也很低 (低于 10%). 因而, 中子注量的增加, 主要是

ICRF 加热的贡献. 三次放电, 随着 ICRF 功率的升高, 中子注量在加 ICRF 时段内也相应的增加. 图 7 统计了 17 炮, 24 MHz 的 ICRF 加热期间, 单位时间内  $^3\text{He}$  探测器测量的中子数与其对应的 ICRF 注入功率. 通过初步拟合显示, 中子注量随 ICRF 功率的升高, 迅速增涨, 当 ICRF 功率升高到一定程度时, 中子注量增涨放缓<sup>[10]</sup>.

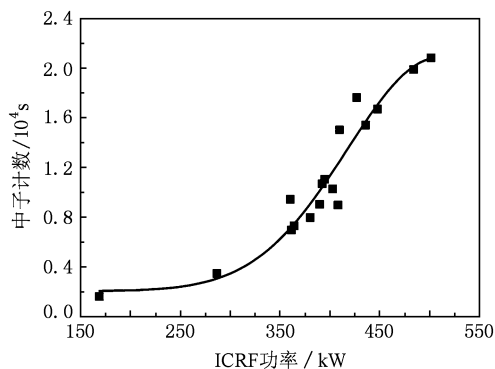


图7 中子辐射强度与 ICRF 注入功率

## 6. 结 论

HT-7 上进行射频波辅助加热时,通过中子注量

演化的测量结果以及探头的标定系数,结合聚变中子产额估算结果分析得到:低功率的 LHW 加热时,容易引发逃逸,产生大量的光中子.增大 LHW 功率及等离子体密度,逃逸被抑制的情况下聚变中子占主导,但总的中子产额很低(略高于同条件的欧姆放电).结果表明,LHW 加热对于提升离子温度,增大聚变反应率的贡献不大.以模转换模式加热的 ICRF 频率在 27 MHz(或 24 MHz)时,实际注入功率超过 300 kW,便可以使中子注量显著增涨.在不考虑光中子以及假设离子速度仍为 Maxwell 分布的情况下,结合中子注量的测量值与聚变中子产额的估算进行分析. ICRF 以模转换方式加热时,能够有效的提高离子温度,增大聚变中子产额.

- [1] Shi B R 1999 *Magnetic Confinement Fusion Principles and Practice* (Beijing: Atomic Energy Press) p188 (in Chinese) [石秉仁 1999 磁约束聚变与实践(北京:原子能出版社)第 188 页]
- [2] Krasilnikov A V, Sasao M, Kaschuck Yu A, Nishitani T 2005 *Nucl. Fusion* **45** 1503
- [3] Wan B N, Shi Y J, Xu G S, Gong X Z 2004 *Nucl. Fusion* **44** 400
- [4] Zhong G Q, Hu L Q, Zhu Y B, Lin S Y, Chen J Q, Xu P, Duan Y M, Lu H Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3262 (in Chinese) [钟国强、胡立群、朱玉宝、林士耀、陈珏铨、许平、段艳敏、卢洪伟 2009 物理学报 **58** 3262]
- [5] Yang J W 1996 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **16** 24 (in Chinese) [杨进蔚 1996 核聚变与等离子体物理 **16** 24]
- [6] Bosch H S, Hale G M 1992 *Nucl. Fusion* **32** 611
- [7] Yang J W, Song X Y, Li X, Zhang W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1648 (in Chinese) [杨进蔚、宋先瑛、李旭、张炜 2005 物理学报 **54** 1648]
- [8] Chen Z Y, Wan B N, Shi Y J, Hu L Q, Xu H D, Li G C 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 900
- [9] Yang J W, Zhang G Y, Liang W X, Zeng Q X, Gong D F, Shi M L, Lu J, Feng B S 1993 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **13** 32 (in Chinese) [杨进蔚、张光阳、梁文学、曾庆希、龚定夫、施明亮、卢杰、冯北生 1993 核聚变与等离子体物理 **13** 32]
- [10] Anderson D, Core W, Eriksson L G 1987 *Nucl. Fusion* **27** 911

## Study of neutron radiation behavior for RF heating on HT-7<sup>\*</sup>

Zhong Guo-Qiang<sup>1)2)†</sup> Hu Li-Qun<sup>2)</sup> Wang Xiang-Qi<sup>1)</sup> Li Xiao-Ling<sup>2)</sup> Lin Shi-Yao<sup>2)</sup>  
Xu Ping<sup>2)</sup> Duan Yan-Min<sup>2)</sup> Mao Song-Tao<sup>2)</sup> Zhang Ji-Zhong<sup>2)</sup>

1) (*School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China*)

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

(Received 8 January 2010; revised manuscript received 3 March 2010)

### Abstract

Neutron radiation was specially correlated with the type and the power of the radio frequency (RF) heating for deuterium plasma on HT-7 tokamak. We have researched the production mechanism of the fast neutron under different RF heating conditions by the fast time-resolved neutron flux measurement system made up of  $\text{BF}_3$  and  $^3\text{He}$  proportional counters. Lower power of LHW heating was apt to bring about runaway discharge and produce a mass of photoneutrons. The rate of fusion neutron and the total neutron yield will rapidly increase with the ion cyclotron resonance heating at the special frequencies of (27 MHz and 24 MHz).

**Keywords:** radio frequency heating, neutron, tokamak

**PACS:** 29.40.-n, 52.70.Nc, 52.55.Fa

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10935004) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10775041, 10675124).

<sup>†</sup> E-mail: gqzhong@ipp.ac.cn