

HT-7 超导托卡马克上 时间分辨中子注量率测量

陈珏铨, 朱玉宝, 万宝年, 李建刚

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:本文介绍了 HT-7 超导托卡马克上的时间分辨中子注量率测量系统。在高参数放电状态下, 计算得到中子产额在 10^8 s^{-1} 量级, 在靠近装置边上的中子注量率处于 $10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级, 因此, 选择 BF_3 正比计数管作为探测器。经过多次实验, 测量系统运行稳定可靠, 测量得到的中子注量率和估算得到的中子注量率在误差范围内一致。

关键词:托卡马克; 中子产额; 时间分辨; 中子注量率

中图分类号: O242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2005)01-0033-05

Time-resolved Neutron Flux Density Measurement on HT-7 Superconducting Tokamak

CHEN Jue-quan, ZHU Yu-bao, WAN Bao-nian, LI Jian-gang

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

Abstract: The time-resolved neutron flux density measurement system on HT-7 Tokamak is presented in the paper. When the machine is operated in high performance mode, the total neutron yield is estimated to be about 10^8 s^{-1} , and the neutron flux density near the vacuum vessel is about $10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Therefore, BF_3 proportional counter based system was constructed and successfully implemented on HT-7. The measurement system works stably during a series of experiments. The measured neutron flux density is in agreements with that from the numerical estimation.

Key words: Tokamak; neutron yield; time-resolution; neutron flux density

随着磁约束高温等离子体聚变实验参数越来越高, 一般的大中型装置都已有可观察的中子产生。通过中子注量率测量系统, 可以了解等离子体内部的许多重要信息。HT-7 超导托卡马克的主要研究目标是获得并研究长脉冲或

准稳态高温等离子体, 并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。在 HT-7 实验中, 由于放电参数的不断提高, 状态的不稳定, 中子测量已经变成一项必要的诊断。通过对中子

收稿日期: 2003-07-21; 修回日期: 2003-10-13

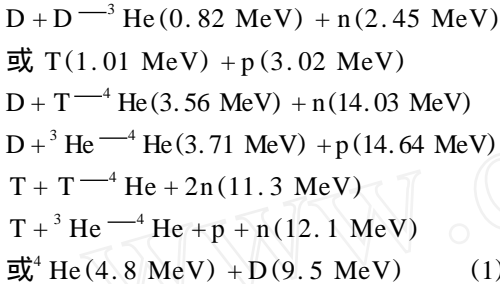
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10305013); 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金资助项目(20020601)

作者简介: 陈珏铨(1979—), 男, 浙江长兴人, 硕士研究生, 等离子体物理专业

辐射行为的研究有助于理解相关的物理问题。

1 中子产额和中子注量率的估算

HT-7 装置中所充工作气体的主要成分是 D, T 的含量很少, 因此, 在装置稳态运行时, 产生中子的聚变反应主要有以下几种:



氘氘反应是装置中发生的最主要的聚变反应, 氘氘反应和其它反应发生的几率很低, 在这里不予考虑。D 和 D 之间发生的聚变反应产生的功率密度公式表示为^[1]:

$$P_{fus} = \frac{1}{2} n_D^2 \nu_{DD} E_{DD} \quad (2)$$

式中: n_D 为 D 离子密度; ν_{DD} 为反应几率的函数, 为反应截面, ν 为反应 D 离子的相对速度; E_{DD} 为氘氘反应放出的能量。

当反应离子密度呈均匀分布时, 单位体积、单位时间内的热核中子产额为:

$$N = \frac{1}{2} n_D^2 \nu_{DD} \quad (3)$$

HT-7 装置的主体是瘦环 (环径比为 4.52), 应用一级圆柱近似, 取坐标系 (θ, ϕ, r) , 其中, θ 为环向, ϕ 为极向, r 为小半径方向。将离子密度在极向截面上的分布近似为二项式分布, 离子温度也视为二项式分布, 令 R 为大环半径, a 为小环半径, T_{D0} 为中心 ($r=0$) 最高的离子温度, 假设边界 ($r=a$) 的离子温度为零, n_{D0} 为中心最高的离子密度, 并假设边界的离子密度为零, 将离子温度 T_D 分布^[2] 和离子密度 n_D 分布均视为轴对称分布 (与 θ, ϕ 无关), 则离子密度和温度的表达式分别为:

$$\begin{aligned}
 n_D(r, t) &= n_{D0}(t) \left(-\frac{r^2}{a^2} + 1 \right) \\
 T_D(r, t) &= T_{D0}(t) \left(-\frac{r^2}{a^2} + 1 \right) \quad (4)
 \end{aligned}$$

代表氘氘、氘氘聚变反应几率的函数 ν 是对粒子的分布函数 (基本上是麦克斯韦分布) 做了平均的量, 因此是粒子温度的函数, 由

Hively^[3] 归纳成为式 (5)、(6):

$$\nu_{DD} = a_1 (1 + a_3 T) T^{-2/3} \exp(-a_2 / T^{1/3}) \quad (5)$$

$$\nu_{DT} = \exp\left(\frac{a_4}{T} + a_2 + a_3 T + a_4 T^2 + a_5 T^3 + a_6 T^4\right) \quad (6)$$

式 (5) 中: $a_1 = 2.0018602 \times 10^{-14}$; $a_2 = 19.307336$; $a_3 = 5.7756259 \times 10^{-3}$; $a_4 = 0.94955669$ 。式 (6) 中: $a_1 = -21.377697$; $a_2 = -25.204054$; $a_3 = -7.1013427 \times 10^{-2}$; $a_4 = -1.9375451 \times 10^{-4}$; $a_5 = 4.0246592 \times 10^{-6}$; $a_6 = -1.9826972 \times 10^{-8}$; $a_7 = 0.2935$ 。

式 (4) 中, 是表征离子温度在小半径 r 上分布形状的参数, 由于放电情况通常满足抛物线分布, 故取为 1。图 1 示出了这两种反应的 ν 差别。

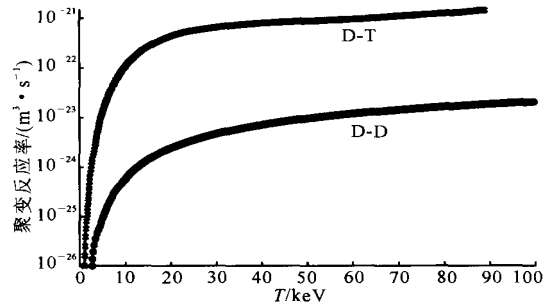


图 1 聚变反应率随离子温度变化

Fig. 1 Variation of the fusion reactivity with ion temperature

将式 (4) 中的离子温度代入式 (5), 得到聚变反应几率 ν 与 r 和 T_{D0} 之间的函数关系为:

$$\begin{aligned}
 \nu_{DD} &= a_1 \left[1 + a_3 T_{D0} \left(-\frac{r^2}{a^2} + 1 \right) \right] T_{D0}^{-2/3} \cdot \\
 &\left(-\frac{r^2}{a^2} + 1 \right)^{-2/3} \exp\left[-a_2 \left(-\frac{r^2}{a^2} + 1 \right)^{-1/3} / T_{D0}^{1/3} \right] \quad (7)
 \end{aligned}$$

从式 (3) 出发, 对整个装置环体进行三维体积分, 有:

$$\begin{aligned}
 N &= 10^{28} \frac{1}{2} n_{D0}^2 \nu_{DD} R r dr d\theta = \\
 &2 \times 10^{26} n_{D0}^2 R \int_0^a \nu_{DD} \left(\frac{r^5}{4} - \frac{2r^3}{a^2} + r \right) dr \quad (8)
 \end{aligned}$$

当放电运行参数 $n_{D0} = 0.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、 $R = 122 \text{ cm}$ 、 $a = 27 \text{ cm}$ 、 $T_{D0} = 1 \text{ keV}$ 、 $\tau = 1$ 时, 计

算得 $N = 8.078 \times 10^8$ 。将 T_{D0} 作为从 0.1 到 10.0 keV 变化的变量,得到中子产额 N 随中心离子温度 T_{D0} 的变化示于图 2。

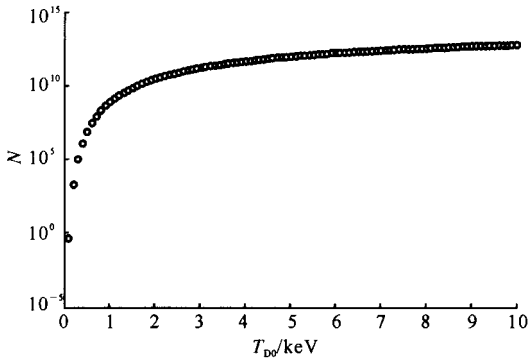


图 2 HT-7 中子产额随中心离子温度的变化
Fig. 2 Variation of the neutron yield with center ion temperature on HT-7

设探测器到装置中心的距离为 l , 用来接收中子的探测器有效面积为 S (这里仅讨论探测器与装置上 $\theta = 0$ 的面处在同一水平高度), 且将探测器视为点状, 不考虑探测器各表面的接收差异^[4], 得到探测器到积分微体积元 ($dV = R d\theta r dr$) 的距离 $L = \sqrt{R^2 + l^2 + 2Rl\cos\theta}$, 微体积元产生的中子数为 $dN = \frac{1}{2} n_D^2 v_{DD} dV$ 。经计算, 得到探测器表面单位面积的中子注量率为:

$$\phi_n = \frac{1}{4L^2} dN = \frac{R}{4} \frac{1}{R^2 + l^2 + 2Rl\cos\theta} \times \int_0^\pi \int_0^{2\pi} n_D^2 v_{DD} r dr d\theta \quad (9)$$

其中: τ 为中子从产生到被探测过程中的屏蔽参数, 装置的屏蔽参数为 0.253, 法兰的屏蔽参数为 0.85。

当 l 分别为 261 (ZZ1)、431 (ZZ2)、226 (ZZ3) cm 时, 三路中子注量率测量的空间分布示于图 3。从式 (9) 可得到中子注量率随中心离子温度 T_{D0} 的变化 (图 4)。

如果将中心离子温度 T_{D0} 固定为 1 keV, 中心离子密度定为 $0.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 将探测器离装置中心距离 l 视为变量, 则可得到注量率随 l 的变化 (图 5)。

可见, 中子产额主要由离子温度及其分布、离子密度及其分布、等离子体体积所决定, 这已

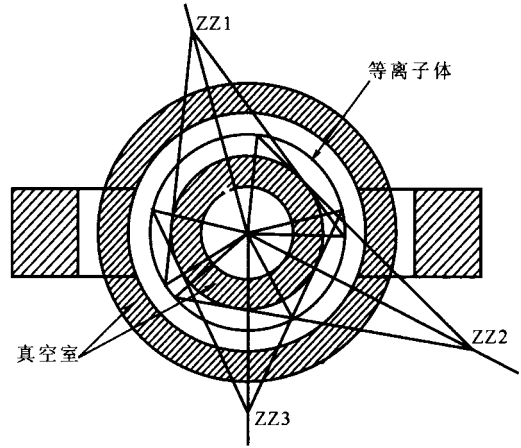


图 3 三路中子注量率测量的空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of the 3-channel flux measurement system

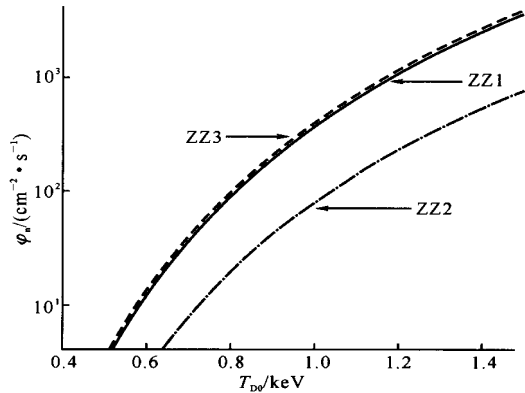


图 4 三路注量率随中心离子温度的变化
Fig. 4 Variation of the 3-channel flux with center ion temperature

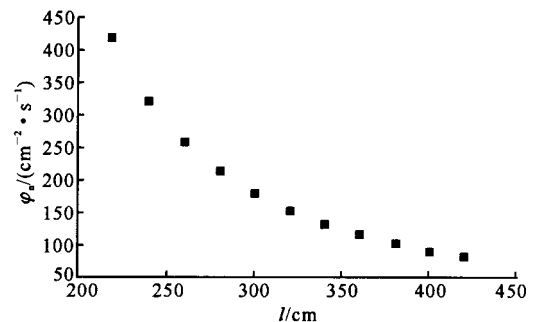


图 5 中子注量率与径向位置的关系
Fig. 5 Neutron flux density vs distance from the center of HT-7

被实验所证实。

2 中子注量率测量系统的建立

HT-7 放电产生的中子主要是由氘氘聚变反应产生的 2.45 MeV 中子。由上述估算可知,在靠近装置边上的中子注量率处于 $10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级。基于此并考虑到装置周边较强的硬 X 与 γ 射线的存在,选择 BF_3 正比计数管作为探测器。为将聚变产生的快中子慢化,在计数管的四周包围了一层聚乙烯慢化体。这种长计数管对 γ 射线不灵敏,且可在较为宽广的中子能量范围内有较均一的探测效率。

从探测器在装置周围的分布(图 3)可知,三路中子注量率测量是相互独立的,分别位于装置的不同环向位置。脉冲计数系统的电子学方框图示于图 6。最终采集到的是单位时间内的接收中子数。采样时间根据中子注量率水平自由调整,通常取为 10 ms。

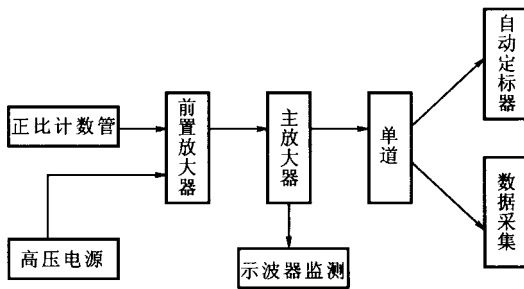


图 6 测量系统电子学方框图

Fig. 6 Electronic settings of measuring system

3 实验结果和估算的对比

上述的估算方法需满足以下条件:1) 离子速度分布函数必须是麦克斯韦分布,离子速度分布中若有少量的高能尾部,则使中子产额大为增加,反过来说,这在实验上提供了一个检验分布函数是否是麦克斯韦分布的间接方法,即将由中子测量计算得到的等离子体中的离子温度 T_i 值与其它方法得到的 T_i 值相比较;2) 中子必须是由热核反应过程产生,因在放电过程中还存在一些杂散中子源,首先,在四壁和限制器上可能吸附氘离子,当快离子打到那里时,将发生聚变反应而产生中子,如此产生的中子数很少,一般可忽略,其次,是逃逸电子通过电致分裂或光核反应产生中子^[2];3) 离子密度和温度在小半径上的分布应是抛物线分布,在放电

平稳阶段一般能满足此条件。

在放电状态稳定、中心电子密度为 $(1.0 \sim 1.9) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 时,中子注量率与离子温度的关系呈现了和上述估算相同的规律。表 1 和图 7 分别为纯欧姆放电和低杂波(LHW)与离子波恩斯坦波(IBW)协同加热放电时,由中子注量率和相关参数反推的离子温度和由中性粒子分析(NPA)测量的离子温度的比较,离子密度由远红外激光干涉仪测量给出。从表 1 和图 7 可以看出,由 NPA 测量到的离子温度与中子注量率反推的离子温度在误差范围内是一致的。产生误差的主要原因是整个反推过程是基于上述条件估算的,而实际放电过程当中不能完全满足以上条件。在离子温度较低时,各种测量的误差偏大。

表 1 纯欧姆放电时由中子注量率与 NPA 测量得到的离子温度比较

Table 1 Comparison of center ion temperatures from neutron flux density and from NPA for ohmic discharges

炮号	中子信号/ s^{-1}		中心离子温度/keV		10^{-19} 中心离子密度/ m^{-3}
	估算值	测量值	NPA 测量	由 n 反推	
52689	111.6	102.0 ± 10.1	0.558 ± 0.044	0.550	1.40
52687	132.2	126.3 ± 11.2	0.571 ± 0.042	0.570	1.40
53989	189.7	122.2 ± 11.1	0.600 ± 0.050	0.565	1.50
52686	223.9	117.4 ± 10.8	0.614 ± 0.077	0.560	1.40
60370	647.1	637.2 ± 25.2	0.715 ± 0.115	0.715	1.20
60427	730.9	671.3 ± 25.9	0.728 ± 0.190	0.720	1.70

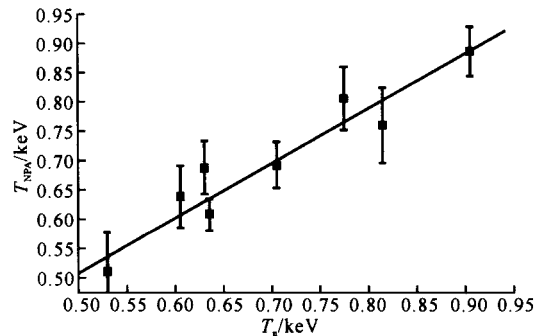


图 7 由中子注量率得到的离子温度 T_n 与 NPA 测量的离子温度 T_{NPA} 比较

Fig. 7 Comparison of center ion temperatures from neutron flux density and from NPA

4 结论

在3年间进行的3次实验中,中子注量率测量系统工作稳定,信号干扰较小,前后数据一致。由NPA测量到的离子温度与由中子注量率及相关参数反推的离子温度在误差范围内一致。同样,通过二维模型估算的中子注量率和实验测到的中子注量率也较为一致。所建立的中子注量率测量系统是稳定、可靠的,这为进一步的分析研究奠定了良好基础。

作者感谢于伟翔、刘胜侠、李贵民、HCN诊断组及全体HT-7实验人员的帮助。

参考文献:

- [1] 石秉仁. 磁约束聚变原理与实践[M]. 北京:原子能出版社,1999. 9~10.
- [2] 项志遴,俞昌旋. 高温等离子体诊断技术(下)[M]. 上海:上海科学技术出版社,1992. 147~149.
- [3] Hively LM. Convenient Computational Forms for Maxwellian Reactivities[J]. Nucl Fusion, 1977, 17:873~875.
- [4] 郭洪生,何锡钧,彭太平,等. DPF中子参数实时测量技术研究[J]. 核电子学与探测技术,2001, 21(4):247~249.
- [5] Jarvis ON, Adams JM, Marcus FB, et al. Neutron Profile Measurements in the Joint European Jorus [J]. Fusion Engineering and Design, 1997, 34-35: 59~66.

混沌保密通信的科研成果通过部级技术鉴定

2004年12月25日,“基于混沌复杂性的数字链路混沌密码机及其在保密通信中的作用”通过了中国核工业集团公司科技与国际合作部主持的技术鉴定。

该成果是中国原子能科学研究院核技术应用研究所方锦清研究员领导的课题组经过长期从事混沌理论及其应用研究所取得的最新成果。他们面对国际上最新兴起的信息技术的巨大挑战,急我国国防事业的需要在国家自然科学基金、中国人事部博士后基金和中国原子能科学研究院院长基金等支持下,独立开展了基于混沌复杂性的数字链路混沌密码机及其在保密通信中的应用研究工作,终于成功地研制了适用于专用及公共电话网的计算机数据通信网络的混沌密码试验样机,并实现了对计算机终端间数据信息的保密通信。

该成果属于新的信息安全技术,不仅可应用于国防领域的信息安全系统和保密通信部门,而且可用于使用专用和公共电话网的各大部委,证券、金融、保险和商业等部门。该成果的核心部分已申请了我国国防发明专利。

专家们听取了工作总结报告、研究报告、试验测试报告和科技查新报告,并观看了演示。经讨论一致认为,该成果技术复杂,具有创新性、先进性和新颖性,其主要表现在:提出并实现了基于混沌理论的“一次一算法”的设计思想,增强了穷举攻击的难度;将混沌密码和传统密码相结合,提出了分组密码算法和动态混沌替换表的思想,增强了AES中S盒的作用,使得能用现代密码安全理论来分析混沌密码新算法的安全性;研制了作为混沌密码发生器的混沌噪声源,适用于速率较高的通信场合;研制了适用于专用和公共电话网的计算机数据通信网络的数字链路混沌密码试验样机,该机是异步数据终端密码设备,实现了对计算机终端间数据信息的加密传输,可应用于现场数据的加密通信。

由于利用电话线路组建计算机通信网络简单易行,覆盖面较大,扩充新用户容易,目前各大部委,证券、金融、保险、工业和商业等部门均采用这种组网方式。该密码机将为上述部门和国家信息的安全传输提供保障,是数据终端用户比较理想的密码设备。它体积小,线路接口标准,安装简单方便,适用于需要进行保密拨号通信的任何场合。因此,利用它可进行新的通信产品的开发研究,以便推广其应用于政府部门、金融机构及大型企业。特别适用于一些重要国防现场数据文件的加密传送,也适合民用保密通信,具有军民两用潜在的市场开发应用前景。