

# HT-7 超导托卡马克装置上中子通量分布 的实验研究

陈珏铨 朱玉宝 傅彦彰 钟国强

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘要** 本文介绍了 HT-7 超导托卡马克装置上中子通量分布的测量实验。在实验中,使用了两种有较强抗伽马能力的中子探测系统:  $\text{BF}_3$  和  $^3\text{He}$  正比计数管及其相应的电子学与数据采集。在 2005 年春季实验中,在相同实验条件下,细致测量并比较研究了真空室外不同水平位置、垂直位置的中子通量。实验研究了真空室窗口和变压器铁芯的存在对测量结果的影响,验证了测量结果与三维数值计算的一致性。本项工作为更深入的物理研究奠定了基础。

**关键词** 托卡马克, 中子通量分布, 正比计数管

**中图分类号** O536

在热核聚变反应实验中,无论是氘氘或氘氚聚变均伴随着大量中子产生,通过测量中子产额和中子通量,可以研究各种放电条件、加热方式及运行模式下聚变反应功率及其时间和空间分布,同时,还可以研究等离子体内离子的温度和密度的分布<sup>[1]</sup>。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。HT-7 的典型工程与物理运行参数如表 1 所示。

表 1 HT-7 的典型工程与物理运行参数

Table 1 HT-7 typical engineering and physics operation parameters

大半径 Major radius /m	1.22
小半径 Minor radius /m	0.27
等离子体温度 Plasma temperature /keV	1.00
等离子体密度 Plasma density /m <sup>-3</sup>	1.00×10 <sup>19</sup>
平均聚变中子能量 Average energy of fusion neutrons /MeV	2.45
典型中子产额 Typical neutron yield /s <sup>-1</sup>	8.08×10 <sup>8</sup>
典型放电脉冲长度 Typical discharge time /s	1.00—5.00

随着近年来 HT-7 超导托卡马克上热核聚变实验研究的快速发展,等离子体温度越来越高,密度越来越大,放电维持时间越来越长,热核聚变的反应率不断提高,中子通量分布的测量及相关物理研究就变得越来越重要<sup>[2]</sup>。HT-7 超导托卡马克上的中子诊断系统包括多种中子探测器、相应的电子学和多路数据采集系统<sup>[3]</sup>,能够测量和分析中子通量的时空分布。本文介绍了在 HT-7 上进行中子通量分布测量的结果。这将为中子辐射防护、装置运行与物理实验提供重要依据<sup>[4]</sup>。

## 1 测量系统的建立

HT-7 放电时产生的中子主要是由氘氘聚变反应产生的 2.45 MeV 中子和由电致分裂和光核反应产生的光中子。由估算可知<sup>[5]</sup>,在靠近装置边上的中子通量处于  $10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  量级。为了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<sup>[6]</sup>。基于此并考虑到装置周边有较强的硬 X 与  $\gamma$  射线存在,选择了  $^3\text{He}$  正比计数管和  $\text{BF}_3$  正比计数管作为中子探测器。这两种中子探测器都有较好的抗  $\gamma$  射线性能。而且,可以在较为宽广的中子能量范围内有比较均一的探测效率。表 2 是两种中子探测器的主要参数和实验过程当中的电子学设置。

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

第一作者:陈珏铨,男,1979 年出生,2005 年于中国科学院等离子体物理研究所获硕士学位,等离子体物理专业,主要从事 HT-7 超导托卡马克上的中子诊断工作

收稿日期:2006-01-09,修回日期:2006-03-09

表 2 中子探测器的主要参数和电子学设置  
Table 2 Main parameters and electronic settings of the neutron detectors

探测器类型 Detector type	尺寸 Dimension/mm	灵敏长度 Active length/mm	热中子灵敏度 Sensitivity (cps·n <sup>-1</sup> ·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	工作电压 Operation voltage /V	采样周期 Sampling cycle /ms
<sup>3</sup> He 计数管 Counter	φ50×410	300	133	1350	10
BF <sub>3</sub> 计数管 Counter	φ50×348	255	25	1700	10

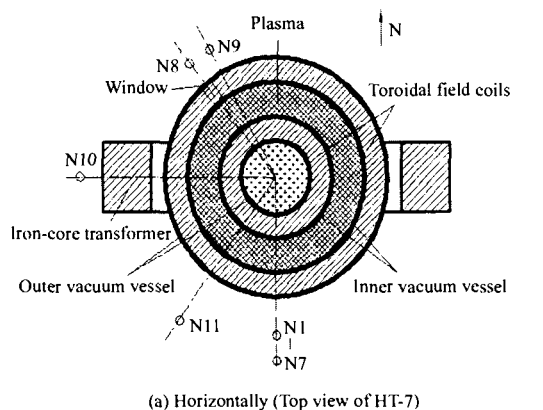
## 2 中子通量的水平位置扫描

为了得到中子通量在水平方向上的分布, 在装置的中平面位置进行了在水平方向上的逐炮扫描。具体放电条件见表 3。在扫描过程当中, 放电条件基本保持不变。扫描的位置 (N1-N7) 和方向见图

1 (a), 测量结果见图 2, 图中的实验值为一次放电中在一定时间范围内 (放电平稳阶段) 的累积中子通量。从图中可以看到, 中子通量随探测点与装置中心的距离增加而降低。实验结果与三维数值计算结果符合得相当好<sup>[7]</sup>。

表 3 中子通量位置扫描时的放电主要参数  
Table 3 Main discharge parameters during neutron flux position scanning

位置 Position	等离子体电流 Plasma current /kA	电子中心弦平均密度 Central line-averaged electron density /m <sup>-3</sup>	低杂波功率 LHW power /kW
水平方向 Horizontally (中平面 Mid-plane)	115	1.2×10 <sup>19</sup>	140
垂直方向 Vertically (中平面以上 Above mid-plane)	145	2.1×10 <sup>19</sup>	0
垂直方向 Vertically (中平面以下 Bellow mid-plane)	115	1.1×10 <sup>19</sup>	135



(a) Horizontally (Top view of HT-7)

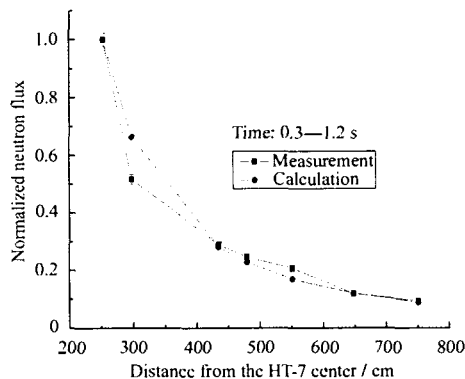
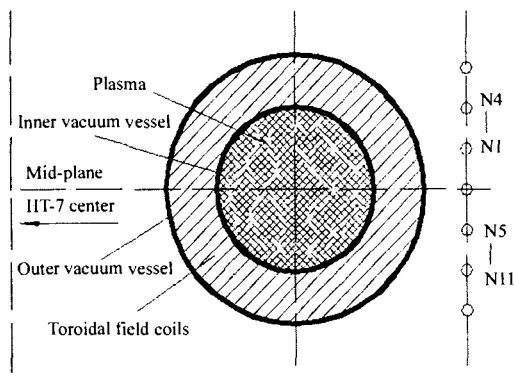


图 2 中子通量在中平面水平方向上的分布  
Fig.2 Neutron flux distribution along horizontal direction on the mid-plane



(b) Vertically (Side view of HT-7)

图 1 中子通量的位置扫描空间分布图  
Fig.1 Spatial distribution of the neutron flux position scanning

## 3 中子通量的垂直位置扫描

同样, 为了得到垂直方向上的中子通量分布, 分别在欧姆加热和低杂波 (LHW) 加热条件下, 进行了垂直方向上的位置扫描, 具体放电条件见表 3。扫描的位置 (N1-N4 和 N5-N11) 和方向见图 1(b), 实验测量结果见图 3。

测量结果显示: 在垂直方向上, 中子通量在装置中平面处最大, 向上下两侧分别呈下降趋势。这个结果与数值计算结果也是一致的。

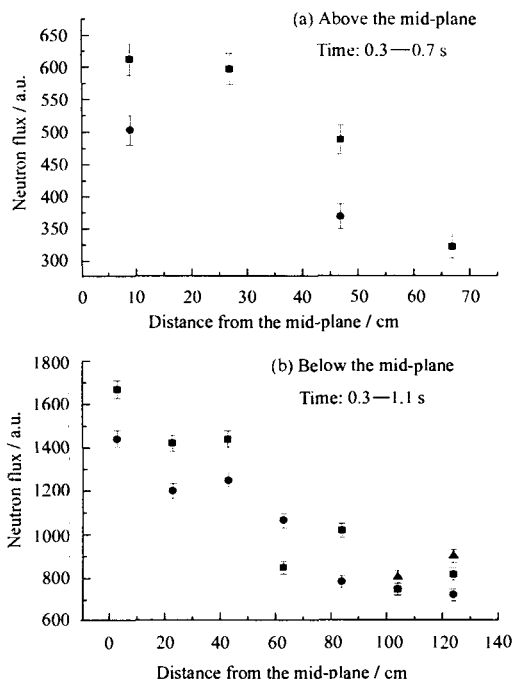


图 3 中子通量在垂直方向上的分布  
Fig.3 Neutron flux distribution along vertical direction

#### 4 真空室窗口和变压器铁芯对中子通量分布的影响

在 HT-7 超导托卡马克上, 有一个变压器铁芯和若干个水平窗口与垂直窗口 (见图 1)。这两者的存在显然对中子通量的分布有影响。HT-7 内外真空室间的材料组成和结构比较复杂, 如果简单地考虑, 那么, 其中最主要的有: 铜 (约 3 cm)、铝 (约 5 cm) 和不锈钢 (约 1.6 cm), 而在有窗口的地方, 主要的只有不锈钢, 厚度为 0.8—1.5 cm 不等。

实验分别测量与对比了真空室窗口外侧 (测量点 N8) 和真空室外侧 (N9) 的中子通量, 中子探测器放置在中平面位置, 见图 1(a)。测量结果见图 4。从图中可以看到, 真空室窗口外侧的中子通量比没有窗口处强, 这很显然是由于窗口处材料对中子的屏蔽相对较弱的原因, 这与简单的中子屏蔽估算结果一致。

同样, 我们对变压器铁芯外侧 (N10) 和真空室窗口外侧 (N11) 的中子通量进行了测量与对比。测量位置见图 1(a), 测量结果见图 5, 图中 IBW 指离子伯恩斯坦波。根据上述中子通量水平位置和垂直位置的扫描结果, 测量点 N10 和 N11 的位置差异引起的中子通量差别小于 50%。从图中可以看到, 变压器铁芯的存在大大降低了铁芯两侧的中子通量, 对中子起了很好的屏蔽作用。

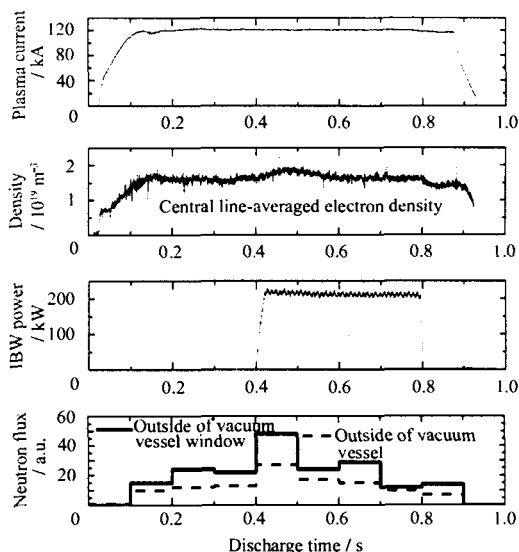


图 4 真空室窗口外侧和真空室外侧的中子通量对比 (炮号 60794)

Fig.4 Neutron flux comparison between outside of vacuum vessel and outside of vacuum vessel window (Shot No 60794)

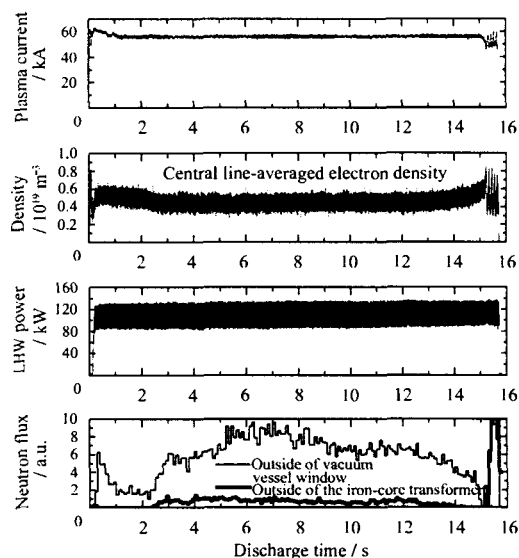


图 5 变压器铁芯外侧与真空室窗口外侧的中子通量对比 (炮号 76303)

Fig.5 Neutron flux comparison between outside of the iron-core transformer and outside of vacuum vessel window (Shot No 76303)

#### 5 结论

在 HT-7 上进行的中子通量分布测量结果显示, 中子通量随探测点位置改变而改变, 中子通量的空间分布和具体的等离子体参数有关。

在装置中平面位置上, 中子通量随探测点与装置中心的距离增加而降低; 在垂直方向上, 中子通量在中平面处最大, 向上下两侧分别呈下降趋势; 二者与三维数值计算结果一致。真空室窗口外侧的

中子通量比没有窗口处的中子通量强。变压器铁芯两侧的中子通量比相同水平和垂直位置的中子通量小约一个量级,可见变压器铁芯的存在起了屏蔽中子的作用。

中子通量分布测量为中子辐射防护、装置运行与物理实验提供重要依据,并且为更深入的物理研究奠定了基础。

### 参考文献

- 1 Jarvis O N, Adams J M, Marcus F B, *et al.* Fusion Eng Des, 1997, **34-35**: 59—66
- 2 Li J G, Wan B N, Luo J R, *et al.* Phys Plasma, 2003, **10**: 1653—1658
- 3 Zhu Yubao, Chen Juequan, Li Guiming. Rev Sci Instrum, 2004, **75**(10): 4284—4286
- 4 Jarvis O N. Plasma Phys Control Fusion, 1994, **36**(2): 209—244
- 5 陈珏铨, 朱玉宝, 万宝年, 等. 原子能科学技术, 2005, **39**(1): 33—37  
CHEN Juequan, ZHU Yubao, WAN Baonian, *et al.* At Energy Sci Technol, 2005, **39**(1): 33—37
- 6 Hanson A O, McKibben J L. Phys Rev, 1947, **72**(8): 673—677
- 7 Fu Yanzhang, Zhu Yubao, Chen Juequan. Neutron yield and flux calculations on HT-7 superconducting tokamak, International Workshop on Frontier Research in Radiation Physics and Related Areas, Chengdu, China, 2004

## Experimental study of neutron flux distribution on HT-7 superconducting tokamak

CHEN Juequan ZHU Yubao FU Yanzhang ZHONG Guoqiang

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

**Abstract** Measurements of the neutron flux distribution have been performed and presented in this paper. Two kinds of neutron detector system based on high gamma-resistant  $\text{BF}_3$  and  $^3\text{He}$  proportional counters, associated electronics and data acquisition system were used in the experiments. In HT-7 2005 spring campaign, the neutron fluxes of different horizontal and vertical positions outside the vacuum vessel were measured and analyzed in detail under the same discharge conditions. The influences of the existence of the vacuum vessel and the iron-core transformer were studied. The consistency between the measurement and the three-dimensional numerical calculations has been proved.

**Key words** Tokamak, Neutron flux distribution, Proportional counter

CLC O536