

HT-7 超导托卡马克上辐射剂量测量与分析*

陈珏铨** 朱玉宝 张卫

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥,230031)

摘要 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,运行时产生一个复杂的瞬发混合辐射场。本文介绍了该装置上中子辐射剂量率的测量方法以及在欧姆、波辅助加热、长脉冲等放电模式下的剂量率特点,并且给出了 X 与 γ 射线的总辐射剂量测量方法和分析结果。在严格遵守安全操作规程的前提下,目前的等离子体物理实验对人员产生的总辐射剂量低于国家辐射安全标准的规定。

关键词 托卡马克 辐射剂量 中子 X 与 γ 射线

1 HT-7 超导托卡马克放电期间的辐射场分析

HT-7 超导托卡马克形如轮胎状,依靠等离子体电流和环形线圈的强磁场将处于高温等离子体状态的物质约束在环形真空容器里,并以此来实现聚变反应。HT-7 超导托卡马克的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。由于该装置主要进行的是氘-氘(D-D)核聚变反应实验,因而是一个强的放射源:HT-7 运行时主要产生中子辐射、X 与 γ 射线。分析其对周围环境辐射水平的影响很重要;同时,中子将造成装置外围部件和实验仪器的活化。

该装置周围的中子剂量率水平主要取决于等离子体中的离子温度及其分布、等离子密度及其分布,以及等离子体体积。根据 HT-7 目前的典型放电运行参数:中心等离子体密度 $n_{D0} = 1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$,中心离子温度 $T_{D0} = 1.0 \text{keV}$,并且假设等离子密度和温度在小半径方向上分布均为二项式分布^[1],装置大半径 $R = 1.22 \text{m}$,小半径 $a = 0.27 \text{m}$,经过计算可得中子产额为

$N = 8.08 \times 10^8 \text{n/s}^{[2]}$ 。HT-7 上已经获得的最高等离子体参数:等离子体电流 255 kA,离子温度为 1.2 keV,等离子密度为 $6.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$,放电时间长度为 237.1 s。

除少数在特殊放电模式下产生光中子外,HT-7 放电时产生中子的反应主要有以下几种:中子最主要的能量为 2.45 MeV,由 D-D 聚变反应产生;还有一小部分能量为 14.03 MeV 的中子,所占份额在 0.2% 和 2.0% 之间^[3]。



HT-7 放电时由高温热核聚变反应产生一个很强的瞬发混合辐射场。除中子外,主要还有能谱很宽的韧致辐射^[4]。整个电磁波谱能量范围很宽,我们关心的是 X 与 γ 射线。本文主要分析中子和光子的辐射剂量特点及其影响因素。

2 中子辐射剂量率测量和在各种不同的放电状态下的剂量率分析

2.1 测量仪器和测点位置安排

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

** 第一作者简介:陈珏铨,男,1979 年出生,2002 年毕业于四川师范大学物理教育专业,现为中科院等离子体物理研究所等离子体物理专业博士研究生。

本实验所用的中子探测器是三氟化硼正比计数管(ZJ 1306),由北京核仪器厂生产。尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 348 \text{ mm}$,充气压 500 mmHg ,计数率对热中子注量率灵敏度因子为 $25 \text{ cps}/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 。由于计数管中的活性物质 ^{10}B 和热中子的反应截面最高,所以实验中将计数管置于圆筒形高密度聚乙烯慢化体(厚 5 cm)中,用于将光核反应产生的中子和氘-氘聚变中子慢化成热中子,以达到较高的物理探测效率。这种探测器有较好的抗 γ 射线性能。实验之前,用Am-Be中子源测量到的中子注量率灵敏度约为 $15 \text{ cps}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。对于HT-7运行时的实际中子能谱,目前还没有仔细测量,只是用MCNP中子输运程序进行了简单的模拟计算。计算结果显示,经过真空室和聚乙烯慢化体后的中子能谱的主能区在热中子区。因此,探测器可以达到

较高的物理效率。中子注量率-剂量率转换因子来自参考文献[5],换算系数为 $1.25 \times 10^{-4} (\text{rem/h})/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

数据采集系统主要由PCI-8554计数卡^[6]、工控机和数据处理软件GT-7^[7]组成,可以同时采集10路信号,每一路相对独立。系统采集从单道分析器出来的信号,采样周期可以根据实验需要灵活调整,通常设置为 10 ms 。

为了测量中子剂量率的时空分布,探测器在HT-7装置周围的分布如图1所示,探测器圆筒中间横截面与装置中平面等高。N1~N6分别代表从2001年到2004年多轮实验先后布置的中子剂量率测量点。各探头距装置中心距离为:N1(2.61 m),N2(4.31 m),N3(2.26 m),N4(2.26 m),N5(4.81 m),N6(4.81 m),其中N3和N4对称于窗口分布。

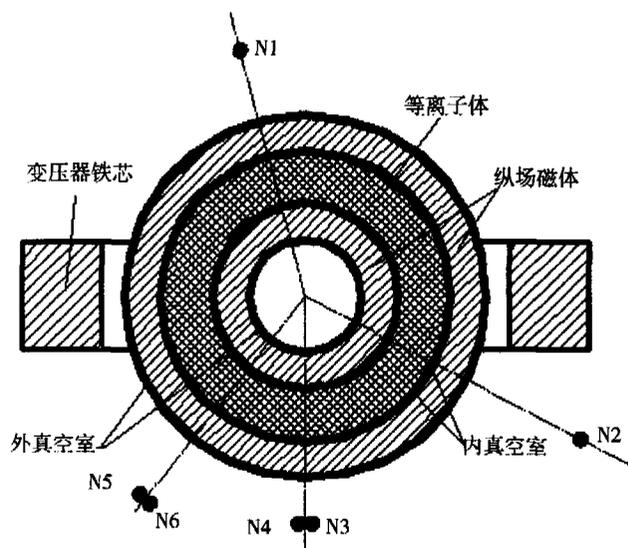


图1 中子剂量率测量点的空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of the measuring system for neutron dose rate

2.2 典型的欧姆放电中子剂量率特征

在纯欧姆加热(Ohmic)放电情况下,通常离子温度偏低,中心离子温度一般小于 0.6 keV ,相应的中子剂量率相比其它放电模式低很多。本实验中子信号采样周期设置为 10 ms ,等离子体密度由多道远红外激光干涉仪测量给出。图2比较了在测量点N1处,在不同的等离子体密度下,中子剂量率随时间的变化。从图2可以

明显看到,等离子体密度高则相应的中子剂量率也高。中子剂量率随时间的大幅度波动是由于等离子体内部的不稳定性引起的。

需要说明的是,计算机系统采集记录的原始数据是每 10 ms 来自探测器的累积脉冲数,处理数据的时候需要调用相关的刻度系数进行处理,最后得到中子剂量率^[8]。

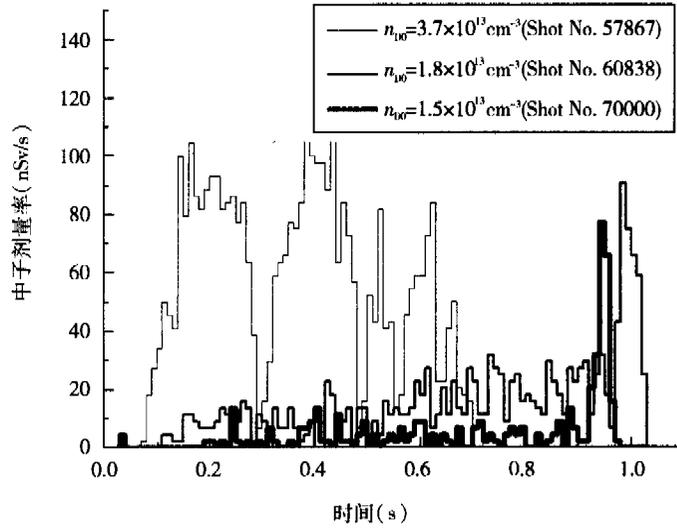


图2 在欧姆放电时不同等离子体密度在N1处的中子剂量率

Fig.2 Neutron dose rate at N1 with different plasma density when ohmic discharge

2.3 长脉冲放电中子剂量率随测量位置的变化

当 HT-7 运行在长脉冲模式下时,典型的等离子体离子温度为 0.4 keV 左右,等离子体密度也比较低,中心等离子体密度 $n_{D0} < 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。根据理论计算^[2],当中心离子温度低于 0.5 keV 的时候,D-D 核聚变反应产生的中子处于探测系统的本底水平。这种情况下的中子辐射剂量率主要由超热高能电子(逃逸电子)通过电致分裂或光核反应产生^[9]。

测量点越靠近装置中心,相应的中子剂量

率越大。图 3 是长脉冲放电(炮号 56780)的中子剂量率随放电时间变化。从图 3 可以看到,三路信号总体趋势一致。N1 和 N3 的位置比 N2 的位置更靠近 HT-7 装置中心,测量到的剂量率也比 N2 处高。N3 的位置比 N1 略靠近装置中心,但是从测量到的剂量率显示 N3 处的剂量率不一定比 N1 处高,而是有一定的起伏变化。这种现象说明:主要是统计涨落所致,也可能放电的整个过程中中子辐射场强度的空间分布不是各向同性的,而且随时间变化。

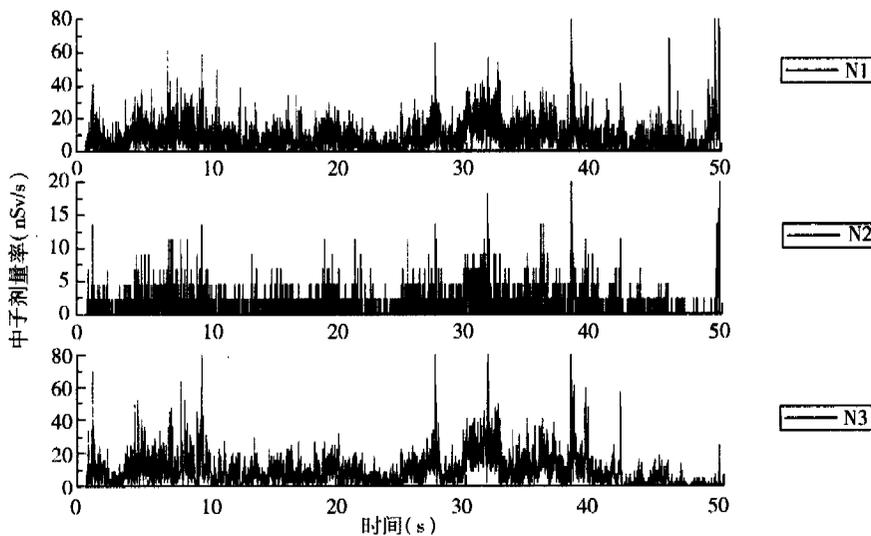


图3 中子剂量率随测量点变化(炮号 56780)

Fig.3 Neutron dose rate varies with the measurement position(Shot No.56780)

2.4 纯欧姆加热等离子体和低杂波加热等离子体的中子剂量率比较

采用低混杂频率范围的射频波对等离子体进行加热,是目前在托卡马克装置中广泛采用的一种加热方式。在有低杂波(LHW)加热放电的时候,通过波与等离子体的相互作用,等离子体的主要参数,尤其是电子和离子温度,得到很大的提高。因为聚变反应功率密度和等离子体中的离子温度强相关,所以,中子产额也相应增加了。从图4可以得到,相对纯欧姆放电(Ohmic),在等离子体密度相同的情况下,低杂波加热使中子辐射场强度得到了显著增强。随着加热功率的提高,这种现象更为明显。

2.5 中子累积剂量随脉冲长度的变化

随着放电脉冲长度的增加,一次放电的中子累积剂量相应的也要增加。图5显示了不同放电长度的中子累积剂量,图中显示最长放电脉冲的累积剂量为4 616 nSv。从图中可以看到剂量随脉冲长度的增加不是简单的线性关系,因为,上文提到一次放电中子累积剂量不仅仅与放电长度有关,还与等离子体密度、温度以及它们的分布有密切的关系。

按图5的变化趋势推测,如果将来的等离子体放电达到1 000 s,那么一次放电的中子累积剂量约为13.7 μ Sv。

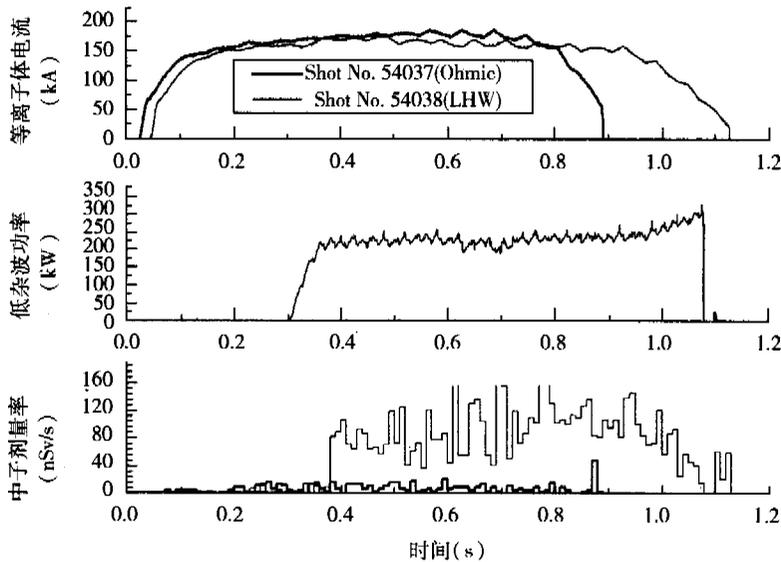


图4 低杂波加热放电(LHW)与纯欧姆加热放电(Ohmic)下中子剂量率变化的比较

Fig.4 Comparison of variation of neutron dose rate between low wave heating mode and ohmic heating operation mode

3 X、 γ 射线剂量测量与分析

本实验所用的X、 γ 个人剂量计由安徽省卫生防疫站提供,热释光磷光体采用LiF(Mg, Cu, P)。

从表1可以看到,2002年之前一轮实验的个人累积剂量在剂量片测量误差范围内,均小于0.10 mSv。2002年12月9日至2003年3月29日连续两轮实验的个人累积剂量为0.43

mSv。实验大厅剂量监测点距装置中心的距离约5.0 m。

表1的个人剂量测量结果表明,个人年剂量低于1 mSv。所以,到发稿为止,等离子体物理实验对实验和运行人员以及公众产生的年剂量均低于国家规定的辐射安全标准^[10]。但是,实验平台上的年累积剂量已经超过辐射安全标准规定限值,我们已经采取了一定的防护措施。

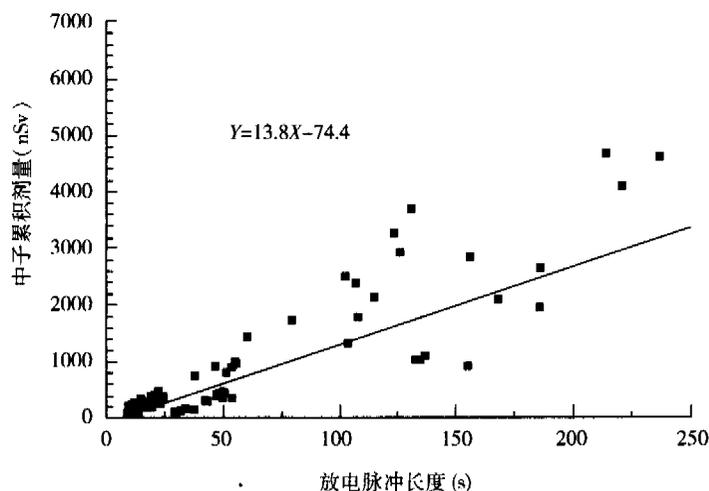


图5 中子累积剂量随放电脉冲长度提高而增加

Fig.5 Cumulative neutron dose increases with discharge pulse length

表1 个人累积 γ 辐射剂量和实验平台累积 γ 辐射剂量测量结果Tab.1 Measuring results of cumulative personal γ dose and experimental hall γ dose

起止时间	总放电次数	最长脉冲长度(s)	个人累积剂量(mSv)	实验大厅剂量 ¹⁾ (mSv)
2002.12.9 ~ 2003.3.29	13172	64.0	0.43	81.80
2001.11.15 ~ 2002.1.12	6186	20.0	< 0.10	9.08
2000.4.7 ~ 2000.5.12	4113	10.0	< 0.10	20.95

1)测点距装置中心约5.0 m。

4 辐射防护措施

首先,HT-7 实验大厅的四周设置有 0.60 m 厚的混凝土墙,并且在实验大厅和控制大厅之间也有 0.60 m 厚的混凝土墙,出入实验大厅的门是约 0.30 m 厚的铅门,可以起到很好的屏蔽作用。

其次,在装置放电的整个过程当中,都有放电的警报铃声。并且,在进入 HT-7 实验大厅各入口处设置有安全控制门禁连锁系统,一旦安全门被意外打开,装置放电立即停止,以保护实验人员不受强辐射的危害。

再次,在 HT-7 实验期间,每位实验和工作人员都佩戴个人剂量监测卡,在一轮实验结束后,剂量卡送往安徽省卫生防疫站进行专门分析,以此来判断每个人的辐射剂量是否超出国家和部门规定的标准。

5 结论

上述的中子辐射剂量率测量表明:按累积

剂量评估,HT-7 装置每次放电最大的累积剂量,在离装置中心 2.60 m 处一般不超过 4 616 nSv/炮,以一轮实验放电 7 000 次计算,每年做两轮实验,那么在离装置中心 2.60 m 处的年中子辐射累积剂量大约为 64.6 mSv。

X、 γ 剂量监测结果表明:在一轮实验中,在离装置中心 5.0 m 处远的平均累积剂量小于 100 mSv。所以,对于目前的 HT-7 实验放电参数,在实验平台上的总辐射剂量中,X、 γ 射线剂量占主要份额。

目前的等离子体实验对实验和运行人员以及公众产生的总辐射剂量低于国家规定的辐射安全标准。但是,实验平台上的年累积剂量已经明显超过辐射安全标准,需要有防护措施。对于将来 HT-7 实验更长脉冲更高参数放电,我们需要考虑可能出现的新情况并采取相应的措施。

感谢中国科学技术大学的李裕熊,中国原子能科学研究院的于伟翔,本所的李建刚、万宝年、高翔、张晓东、刘胜侠、李贵明、傅彦彰、钟国强及全体 HT-7 实验人员对本工作提供的帮助。

参考文献

- 1 杨进蔚. HL-1M 中的聚变中子产额. 核聚变和等离子体物理, 1996. 16(1): 25
- 2 Zhu Yubao, Chen Juequan, Li Guiming. Time Resolved Neutron Flux Diagnostics for Quasi-Steady State Operation Study of HT-7 Tokamak. Rev. Sci. Instrum., 2004. 75 (10): 4284
- 3 Jarvis N. Neutron Measurement Techniques for Tokamak Plasmas. Plasma Phys. and Control Fusion, 1994. 36 (2): 217
- 4 李裕熊, 李珏忻, 吴璨. 国家同步辐射实验室存储环大厅内的瞬发辐射场. 辐射防护, 1995. 15(3): 168
- 5 ANS-6.1.1 Working Group, M. E. Battat (Chairman). American National Standard Neutron and Gamma-ray Flux-to-Dose Rate Factors, ANSI/ANS-6. 1. 1-1977 (N666). American Nuclear Society, LaGrange Park, Illinois, 1977
- 6 ADLINK Technology Inc. cPCI/PCI-8554/R Multi-functions Counter/Timer Card User's Guide. July 31, 2002. < <http://www.adlinktech.cn> >
- 7 Lin Zhu, Jiarong Luo, Guiming Li, et al. The Compression Algorithm for Data Acquisition System in HT-7 Tokamak. Plasma Sci. Technol., 2003. 5(5): 1939
- 8 李裕熊, 李珏忻, 徐炳. 国家同步辐射实验室环境杂散辐射场及其监测系统. 辐射防护, 1999. 19(3): 222
- 9 项志遵, 俞昌旋. 高温等离子体诊断技术(下). 上海: 上海科学技术出版社, 1992. 149
- 10 中华人民共和国国家标准. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准. GB 18871-2002. 北京: 中国标准出版社, 2003

(编辑部收稿日期 2004 年 9 月 14 日)

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF RADIATION DOSES ON HT-7 SUPERCONDUCTING TOKAMAK

Chen Juequan Zhu Yubao Zhang Wei

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

Abstract HT-7 Tokamak is a middle sized magnetic confinement fusion device in operation. It produces a complicated mixed prompt radiation field when working. Briefly introduces the measuring method for neutron dose rate on HT-7, and presents the neutron radiation characteristics under Ohmic, wave heating and long pulse operation mode. The measuring methods of X and γ ray radiation doses and the analysis results are also presented. Following the regulations strictly, the total personal radiation dose received in the plasma experiments are lower than national safety standards.

(Key Words: Tokamak, Radiation Dose, Neutron, X and γ Ray)