

EAST在不同加热模式下的辐射响应研究

周梦洁^{1,2} 胡立群¹ 钟国强¹ 黄良胜^{1,2} 李 凯^{1,2} 周瑞杰¹ 洪 兵¹
肖 敏¹ 张瑞雪^{1,2}

1(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

2(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 利用 EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)上的在线辐射剂量监测系统,对氘氘等离子体实验期间各种加热模式下装置主机厅内中子、 γ 剂量进行测量。对比分析了欧姆加热、低杂波加热、中性束注入加热,以及中性束与射频波协同加热实验时的中子、 γ 辐射强度随时间演化的规律。结果显示:在纯欧姆加热模式,辐射剂量主要来源于逃逸电子韧致辐射产生的高能 $\gamma(X)$ 射线和光中子;低杂波辅助加热时,通常会出环电压下降的现象,离子温度和聚变反应率提高有限,而逃逸电子产生的韧致辐射却被有效抑制,使得总体辐射剂量水平反而低于纯欧姆加热模式;中性束注入加热时,束靶反应使得中子产额提高2~3个数量级,聚变中子以及中子与周围物质核反应产生的 γ 射线成为辐射剂量的主要来源。通过统计归纳得到在中性束注入加热时,中子周围剂量当量与 γ 周围剂量当量存在近似的线性关系。该线性关系对于中性束与各种射频波协同加热实验时,中子、 γ 射线来源于多种途径的情形并不完全适用。

关键词 EAST, 辐射剂量, 加热模式, 中子, γ 射线

中图分类号 TL75, TL62

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030605

Radiation response research under different heating modes of EAST

ZHOU Mengjie^{1,2} HU Liqun¹ ZHONG Guoqiang¹ HUANG Liangsheng^{1,2} LI Kai^{1,2} ZHOU Ruijie¹
HONG Bing¹ XIAO Min¹ ZHANG Ruixue^{1,2}

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

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract [Background] A pulsed hybrid radiation field will be generated by Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) during deuterium plasma discharge. [Purpose] This study aims to explore the radiation doses of EAST under different heating modes to ensure the radiation safety. [Methods] The on-line radiation dose monitoring system of EAST was used to measure the neutrons and γ -rays radiation in the main hall of the device under various heating modes during the deuterium plasma experiment. Evolution of neutron and γ radiation intensity with time under ohmic heating, lower hybrid waves heating, neutral beam injection heating, and neutral beam and radio frequency waves collaborative heating were compared and analyzed. [Results] The results showed that the main sources of radiation dose were high-energy $\gamma(X)$ -rays and photoneutrons produced by runaway

国家自然科学基金(No.11605241、No.11575249)、国家磁约束核聚变能研究专项(No.2015GB103000)资助

第一作者: 周梦洁, 女, 1994年出生, 2017年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 研究方向为核聚变辐射防护

通信作者: 钟国强, E-mail: gqzhong@ipp.ac.cn

收稿日期: 2019-07-17, 修回日期: 2019-12-05

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11605241, No.11575249), National Magnetic Confinement Fusion Energy Research Project (No.2015GB103000)

First author: ZHOU Mengjie, female, born in 1994, graduated from University of South China in 2017, master student, focusing on nuclear fusion radiation protection

Corresponding author: ZHONG Guoqiang, E-mail: gqzhong@ipp.ac.cn

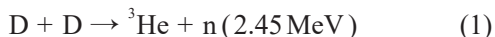
Received date: 2019-07-17, revised date: 2019-12-05

electrons bremsstrahlung radiation in the pure ohmic heating mode. The drop of the loop voltage effectively inhibited the generation of runaway electrons, and the radiation dose level under lower hybrid waves heating mode was lower than that of ohmic heating mode. The beam target reaction increased the neutron yield by 2–3 orders of magnitude. The approximate linear relationship between neutron and γ ambient dose equivalent was found by statistical induction under neutral beam injection heating mode, but it was not completely applicable to the situation that the neutrons and γ -rays came from various ways when the neutral beam and radio frequency waves were heated together.

[Conclusion] The study can lay a good foundation for the establishment of fusion radiation dose database.

Key words EAST, Radiation dose, Heating mode, Neutron, γ -ray

聚变能是一种安全、清洁,取之不尽用之不竭的新能源,其开发利用研究对于解决人类未来能源危机具有重要意义。通过半个多世纪的探索研究,磁约束核聚变被认为最具有商业应用前景。国内的东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)是世界首台建成并投入运行的全超导偏滤器位形托卡马克磁约束聚变实验装置,建有大功率射频波、中性束注入辅助加热系统,70余项先进的等离子体诊断系统^[1]和完善的在线辐射剂量监测系统。运行初期,EAST进行了少量的氢、氦等离子体测试实验,现阶段主要开展氦等离子体聚变实验研究。通过兆瓦级的大功率辅助加热提高等离子体温度,促使氦核燃料发生如式(1)、式(2)的氦氦聚变反应,并释放大量的快中子。



EAST作为I类射线装置,在开展氦等离子体实验时除了产生聚变中子外,还存在X、 γ 射线。其中高温等离子体中本底热电子发生薄靶韧致辐射以及杂质离子发生线辐射产生的大量低能X射线(keV量级),受装置内、外不锈钢真空室壁的遮挡屏蔽,不会对外围辐射环境产生影响。当等离子体中的电子受到的电场力大于碰撞阻尼力而被持续加速后成为高能逃逸电子,这部分高能逃逸电子轰击装置器壁或孔栏,发生厚靶韧致辐射产生的高能硬X射线(MeV量级),则较易穿透装置器壁,对外部辐射剂量产生贡献。此外,高能逃逸电子或高能硬X射线还会与装置第一壁、杂质等材料发生核相互作用,当能量超过反应阈值时,光中子产生。高能 γ 射线则主要来自下列三条途径:辅助加热产生的高能离子与杂质发生核反应产生 γ 射线;中子输运过程中与周围材料发生非弹性散射以及捕获反应产生 γ 射线;装置主机、周边设备及大厅的结构材料发生中子活化反应产生放射性同位素,其衰变过程中产生 γ 射线。EAST装置氦运行时中子产额最高可达 $1.0 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ (设计值),对周围辐射剂量水平的高低起主导作用。DD聚变中子(2.45 MeV)的产额正比

于聚变核反应率,其与燃料离子的温度(T_i)、密度(n_i)、快离子速度分布(v_i)、能量及粒子约束时间(τ_e 、 τ_p)等参数密切相关。为提高这些与聚变核反应直接相关的等离子体参数,如今大、中型磁约束聚变装置均会开展大量的高功率加热实验研究。近年来,EAST装置通过不断的升级改造,已建成源功率总计达30 MW的射频波与中性束注入辅助加热系统,并开展了各种加热模式的等离子体实验。本文展示了各种加热实验期间中子、 γ (X)辐射强度演化的测量结果,并对不同实验条件下的辐射行为和剂量分布特征进行了分析研究。

1 实验系统概况

1.1 EAST装置及加热系统

EAST聚变装置由全超导托卡马克主机以及电源、低温、辅助加热、计算机控制、诊断测量、数据采集等多个系统构成,其主要的工程参数如表1所示^[1]。为实现高参数、高约束稳态运行的实验目标,需充足的外部辅助加热手段。目前,EAST装置已建成并投入了多套兆瓦量级的高功率辅助加热系统。其中包括以电子加热为主的电子回旋共振加热(Electron Cyclotron Resonance Heating, ECRH)和低混杂波(Lower Hybrid Waves, LHW)加热,以离子加热为主的中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)加热,既加热离子又加热电子的离子回旋射频(Ion Cyclotron Radio Frequency, ICRF)加热。根据等离子体实验内容的需求,来选择以上各种加热模式及其组合。辅助加热的性能直接影响等离子体的参数品质,进而对聚变核反应率以及反应产物中子产生作用。因此,EAST辅助加热实验既是聚变等离子体物理研究的热点,又是辐射剂量监测研究的重点。

1.2 相关监测系统

EAST装置运行期间产生的中子、 γ (X)剂量主要依靠实时在线辐射剂量监测系统和离线累积剂量计监测系统测量。在线辐射剂量监测系统由

表1 EAST装置主要工程技术参数
Table 1 Main engineering parameters of EAST device

参数名称 Parameter	数值 Value
大半径 Smooth radius / m	1.88
小半径 Minor radius / m	0.45
等离子体电流 Plasma current / MA	1
纵场 Longitudinal field / T	1.5~3.0
电子回旋 ECRH / MW	4
离子回旋 ICRF / MW	12
低杂波 LHW / MW	10
中性束注入 NBI / MW	8

13个监测点组成,各监测点包括一台BF₃中子探测器和一台高压Ar气电离室^[2]。通过RS485接口和以太网进行数据通信组网,在装置进行放电实验期间24 h连续运行,具备秒级(最高1 s)时间分辨能力。根据监测点的位置差异,在装置主机厅内的3个监测点采用高量程的区域辐射监测探头,降低聚变等离子体脉冲辐射测量的堆积概率。位于主机厅1.5 m厚屏蔽墙外的10个监测点,采用高灵敏度的环境辐射监测探头^[3],可对微量辐射进行有效测量。此外,在各监测点还布置了光释光和固体核径迹剂量片,分别对 γ (X)和中子剂量进行累积测量^[4]。其测量的结果,可与在线辐射剂量监测系统测得的累积剂量值进行比对校验。为了便于开展聚变辐射剂量与各种加热模式的关联性研究,主要选取主机大厅内部2号监测点的数据进行分析。该监测点距离EAST主机外柱瓦11.3 m,固定于大厅西侧内墙上,离地面约2.2 m。采用的BF₃中子探测器,通过设置一定的脉冲阈值,具备良好的 γ (X)射线甄别能力,同时避免了目前多数剂量当量率仪灵敏度偏低的缺点^[5]。探头经过特别改进设计,在BF₃计数管外增加了热中子吸收层,通过调节吸收层的开孔数和面积来调整探测器的灵敏度,使其满足NBI加热时强中子脉冲辐射剂量监测的需求^[2]。选择的球形高压Ar气电离室探测器,不仅具有较高的灵敏度和良好的稳定性,还通过采用脉冲电荷积分技术,使得辐射剂量测量上限极大提高。此外,EAST装置上的中子、 γ 辐射探测器分别采用标准放射源Am-Be源及镭源进行刻度,检定结果显示仪器的总不确定度均小于15%,满足辐射防护仪器校准的要求。

EAST装置运行和辐射响应研究还涉及多项诊断参数,主要包括等离子体电流(I_p)、环电压(Pcloop)、电子弦平均密度(N_e)、中子辐射强度(Neutron-²³⁵U)、高能硬X射线(X-ray NaI)及 γ 射线强度等。其中,最基本的等离子体电流、环电压和电子密度参数将用于放电运行控制,而中子辐射强度、

γ (X)射线强度(辐射强度均用计数率表示)等监测结果用于评估等离子体参数品质及辐射行为研究。中子注量监测系统测量的计数率为²³⁵U裂变室探测器测量的体积分中子辐射强度,采用重离子加速器打氘靶产生的单能中子(2.4 MeV)对探头的效率进行刻度,其绝对探测效率约为0.17%。高能硬X射线测量系统和 γ 射线测量系统是研究聚变等离子体中快电子、逃逸电子及快离子动力学行为的重要手段。其中,高能硬X射线和 γ 射线分别采用NaI(Tl)、LaBr₃(Ce)闪烁体探测器进行测量。采用多种同位素放射源(¹³⁷Cs、¹⁵²Eu、²³⁸Pu-¹³C)产生的单能 γ (X)射线(能量范围0.344~6.13 MeV)对NaI、LaBr₃探测器的能量响应进行标定。两种探测器在射线能量为0.2~8 MeV时,均具有良好的能量线性。对于¹³⁷Cs产生的 γ 射线,NaI和LaBr₃探测器的能量分辨率分别为10%、3.9%。

2 不同加热模式下的辐射响应分析

2.1 欧姆加热

利用欧姆场加热等离子体是托卡马克装置最基本的一种加热方式,其对于磁约束聚变等离子体的建立具有重要作用^[6]。因而首先对该加热模式下的辐射剂量进行监测研究。选取了典型的两炮欧姆放电,其放电波形如图1(a)所示。#77056、#77347炮的平均电子密度分别为 $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 和 $1.99 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,等离子体电流均为400 kA。图1(b)表示两炮欧姆放电过程中,在线辐射剂量监测系统2号监测点测得的辐射剂量,其中: N 为中子剂量当量, G 为 γ 剂量当量,Total为总周围剂量当量。两炮(#77056、#77347)等离子体放电产生的中子剂量当量分别为0.4 μSv 和0.3 μSv , γ 剂量当量分别为1.3 μSv 和1.38 μSv ,总周围剂量当量分别为1.7 μSv 和1.68 μSv 。

上述监测结果显示#77347炮的电子密度虽比#77056炮高33%,但#77347炮放电产生的总周围剂量当量却与#77056炮相当。该结果可能是由于#77347炮电子密度大,电子逃逸阈能大(阈能 $W_e \propto N_e/E$, E 为电场强度),逃逸现象得到一定程度的抑制^[7],光中子成分减少,而在欧姆放电中光中子所占中子总产额是主要的^[8],因而中子计数减少,通过中子诱导产生的 γ 射线计数也减少,且与图1(a)中中子、 γ (X)辐射强度的时间演化规律相吻合。故在纯欧姆加热模式下,逃逸电子与物质相互作用产生的硬X射线以及硬X射线发生光核反应产生的光中子对总周围剂量当量贡献较大。

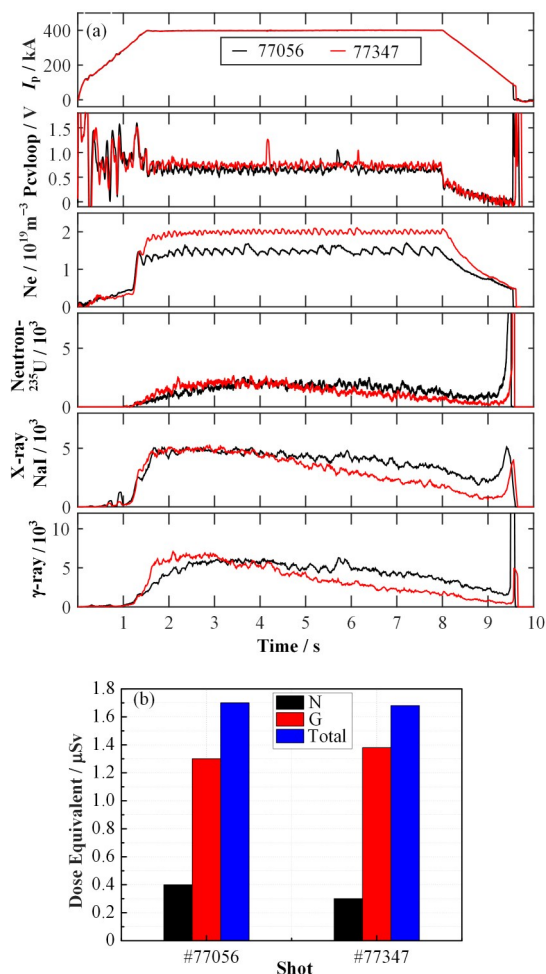


图1 欧姆加热时中子和 $\gamma(X)$ 辐射强度的时间演化(a)及产生的辐射剂量(b)

Fig.1 Temporal evolution of neutron and $\gamma(X)$ radiation intensity (a) and radiation doses (b) under ohmic heating mode

2.2 低杂波加热

低杂波驱动是利用等离子体对输入频段的低混杂波进行耦合吸收,进而加热等离子体^[9]。在该加热模式下主要研究LHW不同注入时刻对辐射剂量的影响。图2表示等离子体电流为500 kA,平均电子密度为 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 时注入频率为4.6 GHz的LHW的放电波形图。在电流爬升阶段,电子密度低,电子逃逸阈能低,产生初始逃逸电子, $\gamma(X)$ 射线计数增加;LHW注入等离子体后,环电压迅速下降,电子逃逸阈能增大,逃逸现象得到明显抑制, $\gamma(X)$ 射线计数逐渐减少且随时间的变化趋势相似;LHW稳定注入期间, $\gamma(X)$ 射线计数非常低且波动较小。#77470、#77481和#78915炮LHW注入等离子体对应的时刻分别为1.98 s、3 s和1.49 s,注入前产生的 γ 射线计数占一炮总 γ 射线计数分别为68%、88%和43%。故LHW注入时刻对 γ 剂量影响较大。

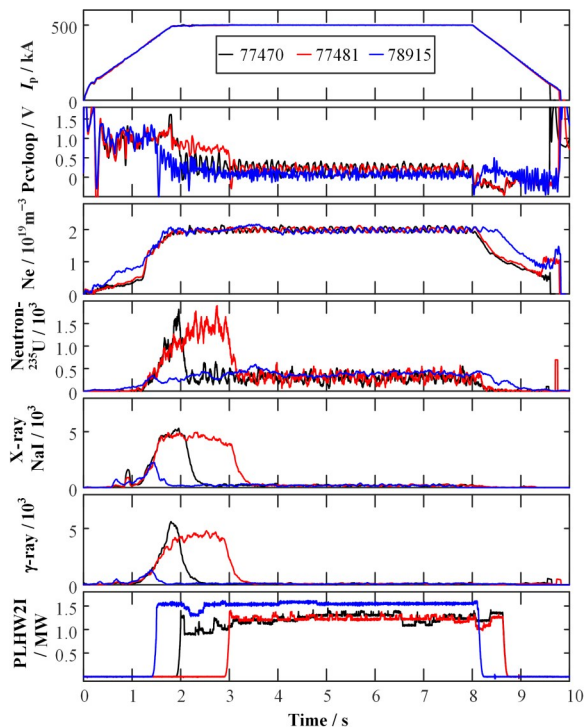


图2 LHW加热时中子和 $\gamma(X)$ 辐射强度的时间演化
Fig.2 Temporal evolution of neutron and $\gamma(X)$ radiation intensity under lower hybrid waves heating mode

图3统计了2018年EAST装置夏季实验中,平均电子密度为 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 和 $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 时,不同LHW注入时刻一炮等离子体放电在2号监测点产生的中子、 γ 剂量当量。其中: g 为 γ 剂量当量, n 为中子剂量当量, $g+n$ 为总周围剂量当量。结果表明:LHW注入时刻不同对低电子密度放电下 γ 剂量当量的影响比高电子密度大。区域1表示中子剂量当量,每一炮放电结束后的中子剂量当量都很低(低于 $0.1 \mu\text{Sv}$),几乎不受LHW注入时刻不同的影响。因而在加热期间,离子温度变化不大,由聚变中子造成

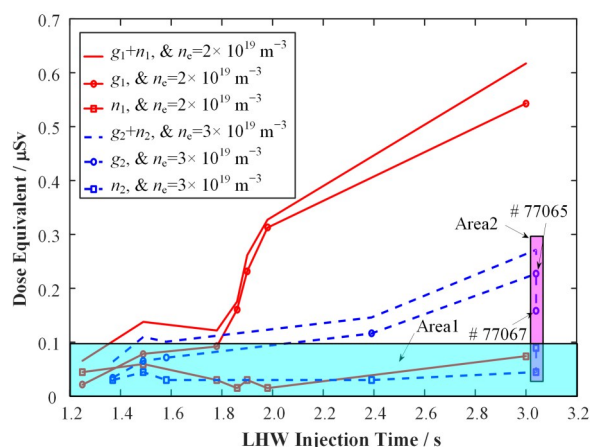


图3 LHW不同注入时刻对中子和 γ 剂量当量的影响
Fig.3 Effects of different injection times of lower hybrid waves on neutron and γ dose equivalent

的剂量当量的影响基本可忽略。区域2表示LHW注入时刻相同(均为3.04 s)、功率不同的两炮。#77065、#77067炮的功率分别为3 051 kW和3 207 kW, #77065炮放电产生的 γ 剂量当量比#77067炮大,说明增加LHW功率,提高了电流驱动能力,降低了等离子体环电压,从而有效抑制了逃逸现象的产生。故LHW加热模式下产生的辐射剂量低于相同条件下的欧姆加热。

2.3 中性束注入加热

中性束注入加热是利用高能中性粒子注入等离子体内,与带电粒子发生碰撞电离等过程,通过热化加热等离子体^[10]。在仅有NBI加热模式下,EAST装置放电过程释放的中子主要来源于聚变中子,而光中子占很少部分,可忽略^[11]。

选取了典型的三炮NBI加热放电,其放电波形如图4(a)所示。其中,等离子体电流均为450 kA, #80981、#80982炮的平均电子密度为 $2.49 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, #80983炮的平均电子密度为 $2.63 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。三炮(#80981、#80982、#80983)等离子体放电在1.1 s时开始注入中性束,对应的实际功率分别为1 260 kW、1 245 kW和1 301 kW,此时中子、 γ (X)射线计数迅速增加,且 γ 辐射强度的时间演化规律与中子类似。中性束注入等离子体后,束靶反应(氘束离子与主等离子体氘靶发生的反应)截面增大,导致聚变中子产额大约增加2~3个数量级,此时 γ (X)射线主要来源于中子核反应。图4(b)表示三炮NBI加热放电过程中,在线辐射剂量监测系统2号监测点测得的辐射剂量,其中: N 为中子剂量当量, G 为 γ 剂量当量,Total为总周围剂量当量。由于中性束注入过程的持续时间不同(分别为6 s、5.5 s和3 s),三炮等离子体放电产生的中子剂量当量分别为6.30 μSv 、5.07 μSv 和2.30 μSv , γ 剂量当量分别为0.68 μSv 、0.61 μSv 和0.35 μSv ,总周围剂量当量分别为6.98 μSv 、5.68 μSv 和2.65 μSv 。表明中子、 γ 剂量当量不仅与中性束注入功率相关,还受注入持续时间的影响。

图5统计了2018年EAST装置夏季实验中,等离子体电流为450 kA、仅NBI加热时单炮等离子体放电在2号监测点测得的中子、 γ 剂量当量。通过拟合得到函数 $D_g(D_n)$ 关系: $D_g=0.1462 \times D_n^{0.92}$,近似为线性,其中: D_n 表示中子剂量当量, D_g 表示 γ 剂量当量。由图5可知,单炮等离子体放电产生的 γ 剂量当量随中子剂量当量的增加近似呈线性增加,表明NBI加热模式下 γ (X)射线主要来源于聚变中子。

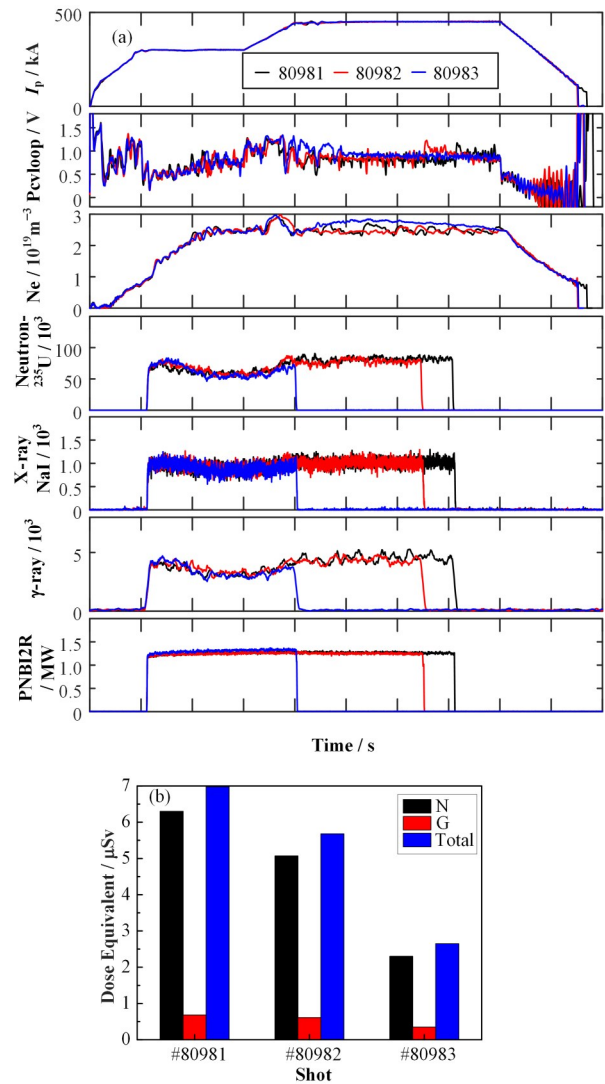


图4 NBI加热时中子和 γ (X)辐射强度的时间演化(a)及产生的辐射剂量(b)
Fig.4 Temporal evolution of neutron and γ (X) radiation intensity (a) and radiation doses (b) under neutral beam injection heating mode

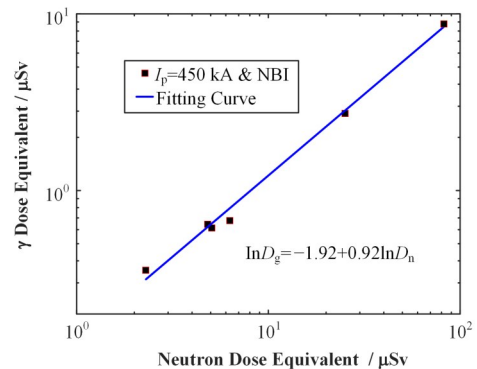


图5 NBI加热时单炮等离子体放电产生的中子剂量当量与 γ 剂量当量的关系
Fig.5 Relationship between neutron and γ dose equivalent produced by plasma discharge of single shot under neutral beam injection heating mode

2.4 协同加热

为研究EAST装置上NBI与射频波协同加热时中子、 γ 射线的多种来源,对2018年EAST装置夏季等离子体放电实验进行了归纳分析,图6统计了等离子体电流为450 kA, NBI与LHW、ECRH及ICRF协同加热时单炮等离子体放电在2号监测点测得的中子、 γ 剂量当量。由其散点分布与仅NBI加热时的函数 $D_g(D_n)$ 关系可知,中子剂量当量在2~40 μSv 区间时,大部分数据点位于曲线下方,表明所有 γ 剂量当量由中子诱导 γ 射线造成,此时中子剂量当量除了聚变中子的贡献外,可能光中子的辐射剂量贡献较大;中子剂量当量在40~80 μSv 区间时,大部分数据点位于曲线上方,表明 γ 剂量当量除了中子诱导 γ 射线造成外,还可能来源于硬X射线、高能离子的核反应等。在NBI+LHW和NBI+LHW+ECRH协同加热状态下,可能硬X射线对 γ 剂量当量贡献较大。NBI与ECRH协同加热时,大部分数据点分布在曲线附近,表明ECRH的加入对中子、 γ 剂量当量影响不大。

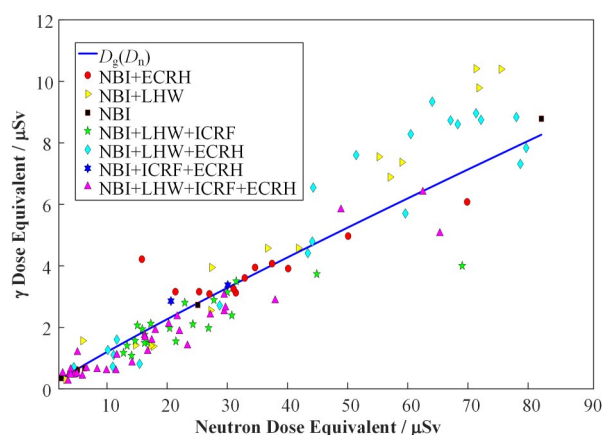


图6 NBI与射频波协同加热时单炮等离子体放电产生的中子剂量当量与 γ 剂量当量的关系

Fig.6 Relationship between neutron and γ dose equivalent produced by plasma discharge of single shot under neutral beam and radio frequency waves collaborative heating mode

3 结语

通过对欧姆、低杂波、中性束注入以及协同加热下中子、 $\gamma(X)$ 辐射强度与剂量的实验测量,并结合氦等离子体运行参数进行分析研究。发现逃逸电子是影响欧姆加热模式下光中子和 $\gamma(X)$ 剂量的主要因素。在等离子体极低密度或高环电压(破裂)的情况下,逃逸电子韧致辐射会产生大量的高能硬X射线以及光中子。低杂波加热能有效驱动等离子体电流、降低环电压,从而减少逃逸电子产生,进而使得

高能硬X射线以及光中子剂量大幅度降低。因此,在相同参数条件下,低杂波加热时的辐射剂量一般低于纯欧姆加热。中性束注入加热时,来自束离子与主等离子体束靶反应产生的DD中子,使得中子总产额提高2~3个数量级。此时中子与周围材料核反应产生的 γ 射线也大幅增涨,其对于监测的 $\gamma(X)$ 剂量贡献占主导。因而,剂量测量结果显示在中性束注入加热时,中子与 $\gamma(X)$ 剂量当量存在 $D_g=0.1462 \times D_n^{0.92}$ 的线性关系。中性束与射频波(LHW、ECRH、ICRF)协同加热时,中子、 $\gamma(X)$ 射线的产生来源更加多样化。因此,中子与 $\gamma(X)$ 剂量当量并不能很好地符合上述的线性关系。通过对各种加热模式下中子、 $\gamma(X)$ 剂量进一步的实验监测和分析,可为聚变辐射数据库建立奠定基础,并为人员和周围环境的辐射防护提供基础数据。

参考文献

- 1 万宝年, 徐国盛. EAST全超导托卡马克高约束稳态运行实验研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(04): 47-59.
WAN Baonian, XU Guosheng. Advances in experimental research towards high confinement and steady state operation on the Experimental Advanced Superconducting Tokamak[J]. Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2019, 49(04): 47-59.
- 2 李凯, 钟国强, 胡立群, 等. EAST托卡马克装置的核辐射监测系统[J]. 核技术, 2015, 38(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110602.
LI Kai, ZHONG Guoqiang, HU Liqun, et al. Radiation monitoring system for EAST tokamak[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110602.
- 3 Li J P, Tang Y L, Shao B B, et al. Intelligent environmental neutron and gamma monitoring system[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1988, 12(1): 12-18.
- 4 徐宇, 徐国盛, 钟国强, 等. EAST实验场所与人员累积辐射剂量监测[J]. 核技术, 2018, 41(4): 040202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040202.
XU Yu, XU Guosheng, ZHONG Guoqiang, et al. Monitoring cumulative radiation dose of experimental sites and staff in EAST[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(4): 040202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040202.
- 5 李桃生. 中子辐射防护监测仪表的发展状况[J]. 辐射防护通讯, 2003, 23(02): 15-20.

- LI Taosheng. Development status of neutron radiation protection monitoring instrument[J]. Radiation Protection Communication, 2003, **23**(02): 15–20.
- 6 石秉仁. 磁约束聚变-原理与实践[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 188–192.
- SHI Bingren. Magnetic confinement fusion-principles and practice[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999: 188–192.
- 7 卢洪伟, 胡立群, 江勇, 等. 全超导托卡马克装置欧姆放电逃逸电子行为研究[J]. 原子能科学技术, 2009, **43**(1): 22–26.
- LU Hongwei, HU Liqun, JIANG Yong, *et al.* Behaviors of runaway electrons generation on experiment advanced superconducting tokamak[J]. Journal of Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(1): 22–26.
- 8 钟国强, 胡立群, 王相綦, 等. HT-7 上射频波加热时中子辐射行为的研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(01): 166–172.
- ZHONG Guoqiang, HU Liqun, WANG Xiangqi, *et al.* Study of neutron radiation behavior for RF heating on HT-7[J]. Journal of Physics, 2011, **60**(01): 166–172.
- 9 Li X L, Wan B N, Zhong G Q, *et al.* Neutron flux in lower hybrid current drive plasmas on EAST[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2010, **52**(10): 105006. DOI: 10.1088/0741-3335/52/10/105006.
- 10 邱励俭. 聚变能及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 274–276.
- QIU Lijian. Fusion energy and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2008: 274–276.
- 11 陈玉庆, 吴斌, 王进芳, 等. 氘中性束注入到 EAST 内的中子产额分析[J]. 核技术, 2013, **36**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.110603.
- CHEN Yuqing, WU Bin, WANG Jinfang, *et al.* Analysis of fusion neutron production in EAST with neutral beam injection[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.110603.