

HL-1M 托卡马克中的中子通量和 辐射剂量当量测量^{*}

杨进蔚 宋先瑛 李 旭 张 炜

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

邴文忠 王世庆

(成都理工大学工程技术学院, 乐山 614007)

(2004 年 6 月 21 日收到, 2004 年 12 月 7 日收到修改稿)

用 5 台带有慢化剂(聚乙烯)的 BF_3 正比计数管中子探测器测量中子通量和剂量当量. 4 台置于 HL-1M 装置的四周, 分别测量了在氦等离子体条件下, 因欧姆加热和波加热产生的热核聚变中子产额、中子通量和剂量, 以及氢等离子体条件下因高能 x 射线引起的光致核反应而产生的光致中子. 另一台流动于其他 6 个观察点, 主要监测中子剂量当量. 在 D-D 聚变条件下, 实测中子产额与计算值作比较, 两者在数量级上大体一致. 中子辐射剂量当量远低于国家和部颁标准, 更低于国际防护委员会推荐的中子辐射允许剂量当量最大值.

关键词: BF_3 正比计数管, 光致中子, 氦-氦聚变中子, 剂量当量

PACC: 5270, 1420C, 2880F

1. 引 言

磁约束聚变研究最直接的目的是为了研制具有商业价值的热核聚变反应堆, 为人类提供廉价、干净且充足的聚变能源. 在热核聚变反应中, 无论是氦-氦(D-D)或氦-氦(D-T)聚变, 均伴随着产生巨量的聚变中子. 通过测量聚变中子的产额、通量及其能谱, 可研究高温等离子体芯部的能量约束和输运过程、运行模式、磁流体不稳定性、等离子体约束、破裂和大破裂; 研究各种放电条件、加热方式及运行模式条件下聚变反应效率、聚变反应功率及其时空分布, 测算其他聚变产物如质子、氦、 ^3He 、 α 粒子等的产额; 评估聚变中子对器壁和周边物质的活化效应、对环境的影响、辐射剂量及其分布、对于堆材料特别是第一壁的辐射损伤(如冷脆、起皱等)对诊断仪器的辐射损害; 开发新的低活性抗中子辐射新材料, 设计聚变中子倍增包层和聚变燃料氦的增殖包层等. 因此, 聚变中子测量是燃烧等离子体最重要的诊断手段. 在 H^+ 等离子体中, 由于高能逃逸电子的韧致辐

射可产生能量超过 10 MeV 的高能 x 射线, 当它们在穿透等离子体或器壁物质时, 如果其能量超过此种物质光致核反应的能量阈值, 将导致光致核反应. 光核反应通常产生光致中子, 但也可产生质子或 α 粒子. 测量光中子的产额、通量及能谱, 为研究逃逸电子行为及其约束、漂移、轨道、不稳定性、逃逸成分、逃逸电子流对第一壁或孔栏的损伤以及对再循环和杂质的影响提供重要的诊断手段. 本文将分别给出 D^+ 和 H^+ 等离子体条件下 4 台 BF_3 正比计数管测出的 D-D 热核聚变中子和光致中子的通量和剂量的时空分布变化, D-D 聚变中子产额测量值及根据 D^+ 等离子体的密度、温度及其分布概算的 D-D 聚变中子产额, 并对环境、辐射防护及剂量安全方面做出评估.

2. 实验安排及测量仪器

本实验的测量仪器为 5 只品质及参数完全相同的 BF_3 正比计数管, 尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$, 内充 $8.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的 BF_3 气体, 置于厚度为 65 mm 的圆筒

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10175012)和核工业西南物理研究院人才再培养基金资助的课题.

型聚乙烯慢化体中,计数管放置在 HL-1M 装置的四周及各探测点,共 10 个探测点,探测点的分布见图 1.

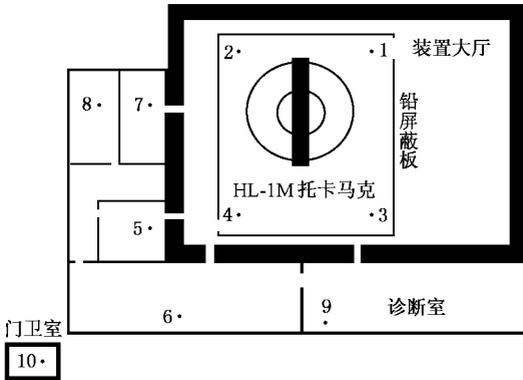
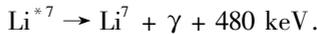
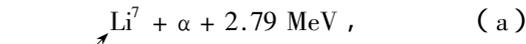


图 1 固定探测器和流动探测器测量点分布示意图

图 1 中位置 1—4 为固定测量点,主要测量中子通量及其分布,探测器圆筒中间横截面与托卡马克中平面等高,中轴线垂直于水平面.位置 5—10 用于测量中子辐射剂量及装置周围辐射本底水平的变化,探测器垂直置于地面上. BF_3 工作电压为 +2000V,输出脉冲高度为十几毫伏,经前置放大器(10 倍)、主放大器(30 倍)、甄别器、成型电路等模块组成的电子学线路,输出幅度为 20 mA、脉冲宽度 0.15 ms 的电流脉冲.探测器对中子的能量响应范围为 0.2 eV—5 MeV;无慢化剂时探测器灵敏度为 $17.0 \pm 0.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$;量程范围为 $2 \times 10^{-2} \text{—} 20/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$.此种探测器有较好的抗 γ 射线性能,因为其核过程为



这里,反应(a)占 6%,反应(b)占 94%,反应生成物 α 粒子和 Li^7 对 BF_3 气体电离,因其电离截面远大于 γ 射线的电离截面,故它们所携带的能量通过电离几乎被完全吸收,形成幅度很高的脉冲.而 γ 射线在透过 BF_3 管时,因康普顿散射仅小部分能量被吸收,形成很小的脉冲,采用幅度鉴别器可将 γ 射线形成的小脉冲去掉,因此 γ 射线对此种探测器的影响可降至最低.在外照射量率为 $4.658 \times 10^{-9} \text{ C/kg} \cdot \text{s}$ 的 γ 辐射场条件下测量中子通量,由 γ 射线引起的误差在 $\pm 3.4\%$ 以内.由于 BF_3 正比计数管易产生寄生脉

冲,所以进行探测效率刻度是必要的.本实验使用的 BF_3 管的探测效率为 $11.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$.

3. D-D 聚变中子测量

氘等离子体中,在欧姆和波加热条件下 D-D 热核聚变中子产额为^[1]

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

式中

$$R(T_i(r,t), n_D(r,t)) = \frac{1}{2} n_D^2 \sigma_{\text{DD}},$$

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

σ_{DD} 的估算可由 Gamow 方程表示为离子温度的函数.

$$\sigma_{\text{DD}} = A_1 T_i(r,t)^{-2/3} \exp[-A_2 T_i(r,t)^{-1/3}].$$

这里, R 是单位体积等离子体中每秒的聚变中子产额; T_i, n_D 分别是氘离子的温度和密度; R_0, r, θ, φ 分别是托卡马克大半径、小半径、极向角和环向角; A_1, A_2 是常数(在 Gamow 表达式中, $A_1 = 2.93 \times 10^{-14} (\text{keV})^{2/3}$, $A_2 = 19.87 (\text{keV})^{1/3}$). 在 D-T 等离子体中, D-T 聚变中子产额为

$$n_{\text{DT}} = \int_{V_p} n_D n_T \sigma_{\text{DT}} dV_p, \quad (2)$$

式中, n_D, n_T 分别是氘、氚离子密度, u 是它们的相对速度, σ_{DT} 的计算见文献[2]. 在 HL-1M 的氘等离子体放电中,我们选择那些 n_D 较高并且硬 x 射线通量很弱的放电,此种情形下光致核反应基本上可以排除.此外,我们也不考虑 D-D 聚变的另一分支 $\text{D}(p, \gamma)\text{T}$, 以及由此引起的 D-T 聚变. 由于我们的探测器可测出中子通量,那么总的中子产额 n_{tot} 可由下式给出:

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

$$S^2 = (R_0 + d)^2 + R_0^2 - 2(R_0 + d)R_0 \cos \beta,$$

(3)

式中, d 是观察点到 HL-1M 托卡马克中心轴线的距离, R_0 是大半径. 图 2 是氘等离子体放电参数及实验测出的距 HL-1M 托卡马克真空室外壳 3 和 4 m 处中子通量的平均值,分别由 1、2 号和 3、4 号探测器测出. 由于中子通量较低,探测器的探测效率有较大涨落,故存在较大的测量误差.同时,这还说明聚变

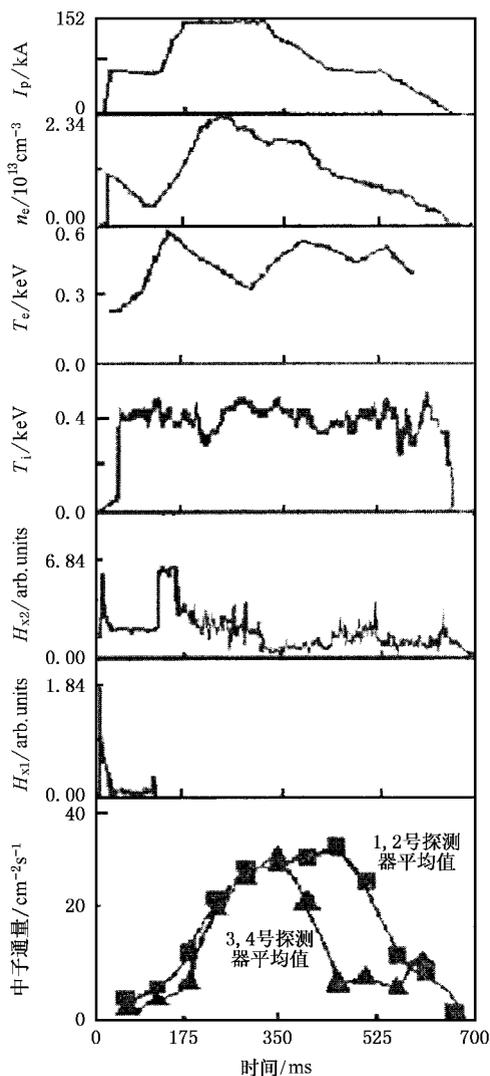


图2 D^+ 等离子体放电时各主要等离子体参数和聚变中子通量的变化. H_{x1} 为 NaI 探测器测到的 $E_x \geq 0.2 \text{ MeV}$ 的高能 x 射线辐射强度; H_{x2} 为 HgI_2 探测器测到的 $E_x \approx 15\text{--}150 \text{ keV}$ 中能 x 射线辐射强度

中子辐射强度的方向性特点. 由于 1, 2 号探测器到装置的距离小于 3, 4 号探测器, 故所测中子通量值略高. 由图 2 观察到的中子通量可以确信来自 D-D 聚变, 此时因等离子体密度升高, 高能逃逸电子锐减, 事实上已观察不到高能 x 射线(见图 2 中的 x 射线辐射强度 H_{x1} 信号), 故不可能由光致核反应产生光中子. 图 3 是所测得的中子通量经 (3) 式得到的聚变中子产额平均值以及由实测所得等离子体离子密度、温度及其分布经 (2) 式的计算值, 两者比较在数量级上相符. 由图 3 可见, 两条曲线的形状大体一致, 说明本测量系统基本可靠. 最大实验测得聚变中子平均值比计算值高出近两倍的原因, 在于 BF_3

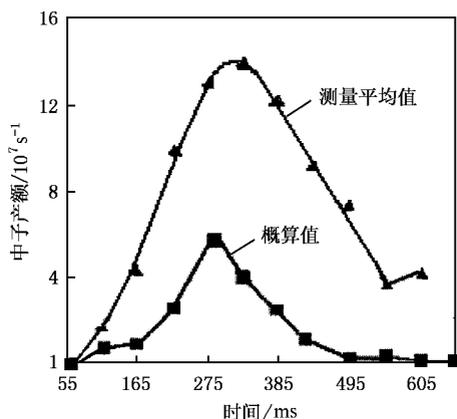


图3 7515 次放电 D-D 聚变中子产额的测量平均值和根据密度、温度测量得到的概算值

探测器测到的中子通量其中有些不是来自因 D-D 聚变产生的中子环, 部分散射中子进入了探测器. 但是由于所使用的 BF_3 探测系统主要用于剂量测量, 运行在脉冲模式下, 其计数率很低(探测器输出 20 mA , 0.15 ms 宽的电脉冲), 所以漏计的可能性很大, 其结果可部分(或全部)抵消散射中子误差. 因此, 我们怀疑本次放电的离子温度和密度的测量值略偏低.

4. 光致中子测量

在 H^+ 等离子体条件下, 我们测量了由高能 x 射线产生的光中子. 若高能电子轰击等离子体中的离子、器壁或孔栏, 因韧致辐射产生高能 x 射线, 在此情形下如果硬 x 射线的能量足够高(超过此种物质的光核反应的能量阈值), 将导致光核反应, 例如 $\text{D}(\gamma, n)$, $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$, $^{52}\text{Cr}(\gamma, n)^{51}\text{Cr}$ 等. 每个高能逃逸电子产生的光中子由下式确定^[3, 4]:

$$Y = 2.47 \times 10^{-6} \frac{Z_L}{A_L A_W} \frac{(E_0 - \epsilon)}{S(Z_L)} X_\gamma \sigma_0 F_W(E_0), \quad (4)$$

式中 A_L , A_W 分别是孔栏和器壁物质的原子量, Z_L 是孔栏物质的原子序数, E_0 是逃逸电子的能量, ϵ 是高能 x 光子的能量, $S(Z_L)$ 是高能逃逸电子在孔栏物质中因电离和辐射能量损失的总和(单位为 $\text{MeV} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^2$), X_γ 是硬 x 射线在孔栏物质中能够产生光致核反应的辐射长度, σ_0 是硬 x 射线透射孔栏物质时的光致核反应的反应截面, $F_W(E_0)$ 是积分因子, 计算方法见文献 [4].

从图 4 可以看出,光中子的产生和峰值与高能 x 射线辐射强度相一致. 根据 JET 的经验公式,光中子的产额为

$$n = 7 \times 10^{12} I_p^{2.6}, \quad (5)$$

式中, n 是光中子的产额(单位为 s^{-1}), I_p 是等离子体电流(单位为 MA). 若按(5)式估算,我们的测量值偏低较多. 其原因是探测器的输出脉冲宽度较大,系统的计数率低,漏计的可能性大;其次是(5)式的定标关系对于 JET 这种大型托卡马克是正确的,但是否适用于中型的 HL-1M 托卡马克则需要斟酌.

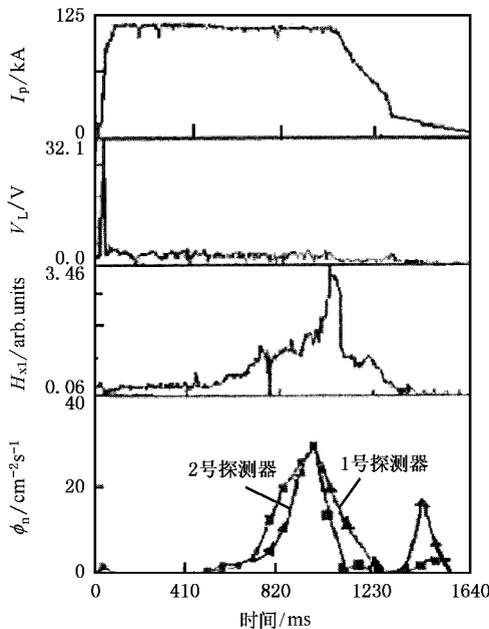


图 4 光致中子通量的测量结果

5. 中子辐射剂量测量

此探测系统主要用于测量中子辐射剂量. 在图 1 所示的各测量点监视中子辐射剂量水平并备有报警装置,中子辐射剂量当量一旦超过有关部门制定的允许剂量当量标准,探测系统将自动报警. 国际防护委员会推荐的中子辐射允许剂量当量(MPD)最大值为 50 mSv/a,国家为保护环境和保护人民群众及放射性从业人员的身体健康,制定了新的更为严格的允许剂量当量标准(5 年累计不超过 100 mSv),核工业总公司制订了比国家标准更严格的允许剂量当量标准(5 mSv/a). 需要说明的是,允许剂量的当量标准是年积累剂量当量,而非瞬时剂量当量率. 中子剂量当量的测量结果见图 5,其中图 5(a)给出

的是 D-D 聚变中子剂量当量测量值,图 5(b)给出的是光致中子剂量当量测量值. 仪器给出的剂量当量值的积累时间为 55 ms. 测量表明:按积累剂量当量评估,HL-1M 装置每次放电中无论是由 D-D 中子或是光致中子引起的积累剂量当量,在距装置环形外壳 3 m 处不超过 50 nSv 水平. HL-1M 托卡马克每年运行中的放电次数以 3000 次计,年最大积累剂量当量仅为 0.15 mSv/a. 而运行和实验人员的工作区离 HL-1M 装置外壳的最近距离超过 10 m,且有简单的

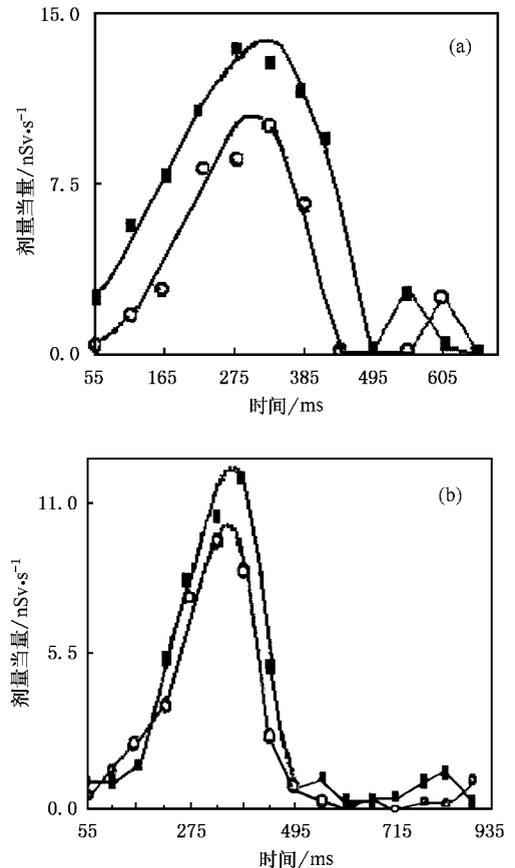


图 5 中子剂量测量结果 (a)D-D 聚变中子剂量当量值 (b)光致中子剂量当量值. ■距 HL-1M 装置外壳 3 m 处,○距 HL-1M 装置外壳 4 m 处

屏蔽物(铅皮和水泥墙,主要屏蔽硬 x 射线和 γ 射线)因此工作人员受到中子辐照的剂量当量远低于最严格的允许剂量当量标准,所以是相当安全的. 由于对脉冲式中子辐照生物效应的研究目前知之甚少,其剂量当量标准套用了连续辐照条件制定的标准. 因此,从安全角度考虑,建议在高功率氘等离子体放电条件下,中子产额达到 $10^{11}/s$ 时,装置四周应覆盖碳-氢化合物中子吸收屏蔽层(如 30 cm 厚的石蜡层或 50 cm 厚的压缩木材).

6. 结论与讨论

我们用 5 台品质及参数完全相同的 BF_3 正比计数管测量了 D-D 聚变中子和光致中子的通量和剂量当量,用实验数据估算了 7515 次放电的 D-D 聚变中子产额,峰值为 $1.5 \times 10^8/\text{s}$,比计算值高出 2 倍.可能的原因在于, BF_3 探测器测到的中子通量之中有些不是来自因 D-D 聚变产生的中子环,部分经散射

的中子进入了探测器,同时不能完全排除硬 x 射线和 γ 射线产生的光致中子的影响.剂量当量测量表明:即使按每次放电最大的累积剂量当量评估,年中子积累剂量当量在离 HL-1M 装置外壳 3 m 处不超过 0.15 mSv,低于最严格的核工业总公司标准(5 mSv/a)水平.对于工作在距 HL-1M 装置外壳 10 m 外的工作人员,受到的中子辐射剂量当量非常低,是相当安全的.对周围环境辐射剂量水平的影响也是非常微小的.

[1] Yang J W 1996 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **16**(1)24 (in Chinese)

Plasma Phys. **13**(3)32 (in Chinese) [杨进蔚、张光阳、梁文学

[杨进蔚 1996 核聚变与等离子体物理 **16**(1)24]

等 1993 核聚变与等离子体物理 **13**(3)32]

[2] Brown R E, Jamie N, Hale G M 1987 *Phys. Rev.* **35** 1999

[4] Jarvis O N, Sadler G, Thompson J L 1988 *Nucl. Fusion* **28** 1981

[3] Yang J W, Zhang G Y, Liang W X et al 1993 *Nucl. Fusion*

Measurement of neutron radiation flux and dose on HL-1M tokamak^{*}

Yang Jin-Wei Song Xian-Ying Li Xu Zhang Wei

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Li Wen-Zhong Wang Shi-Qing

(College of Engineering and Technology, Chengdu University of Science and Technology, Leshan 614007, China)

(Received 21 June 2004; revised manuscript received 7 December 2004)

Abstract

Five BF_3 long counters are arranged in all around the HL-1M tokamak to measure the flux and dose of neutron radiation under the situations: the emission of D-D fusion neutron being in deuterium plasma or the emission of photo-neutron being in hydrogen plasma. The results of measurement are compared with those of calculation, both agree roughly with each other. The dose equivalent of neutron radiation is very low, the measured value is far below the national and ministry issued standards of permissible dose equivalent.

Keywords: BF_3 counter, photo-neutron, fusion neutron, dose equivalent

PACC: 5270, 1420C, 2880F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10175012) and the Retraining Foundation for Talents Ability of Southwestern Institute of Physics, China.