

Z-pinch 中 PF 腔中子发射的产生机制*

郭洪生, 何锡钧, 彭太平

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用束-靶机制和热核机制, 利用 Maxwell 分布, 推导了等离子体焦点装置的中子产生机制、热核反应速率、中子平均能量及中子反应速率。

关键词: 等离子体焦点; 中子产生机制; 中子产额稳定性; 开关

中图分类号: O571.52 **文献标识码:** A

1 引言

20 世纪 40 年代末进行的首次受控热核聚变 (CTF) 曾尝试用线性 Z-pinch. 在 1934 年^[1] 的气体电子学理论中就已经知道了载 z-向电流等离子体的自聚缩性, 并于 1951 年得到了实验证实. 鉴于它的这一特性, 人们自然会想到采用此法在 D-气体中尝试作受控热核聚变. 但它存在的一些不足使人们对它应用于 CTF 的兴趣减少了, 而转向于研究其它的磁约束方法, 如 ϑ -pinch, 环形 pinch (近来的研究认为它不能提供完全约束) 等, 但至今仍远未成功用以聚变实验研究中^[2-4].

一般来说, 要实现受控热核反应, 必须建立一个热绝缘的稳定高温等离子体. 在其中产生的聚变核能, 减去辐射和其它能量损失后, 还能超过加热物质所需要的能量, 在能量上有所增益. 为达到这一点, 对产生反应的轻核等离子体的温度、密度和约束时间将有一定的要求, 其临界要求称之为 Lawson 判据^[1]:

$$\begin{aligned} kT &= 10 \text{ keV}, & \rho\tau &= 10^{14} \text{ s/cm}^3, \\ \rho &= 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ 时}, & \tau &= 0.1 \text{ s}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ρ 为等离子体密度, τ 为约束时间. 但是 Z-pinch 所能达到的条件:

$$\rho = 10^{19-20} / \text{cm}^3, \quad \tau = 100 \text{ ns}, \quad T_i \approx 1 \text{ keV} \quad (2)$$

不能满足核聚变的条件.

2 DPF 的中子发射机理

等离子体焦点 (DPF) 是一种等离子体放电, 焦点等离子体密度高达 $10^{19} / \text{cm}^3$, 温度达几 keV, 持续时间约 100 ns. 它是强脉冲中子源、强 X 光源, 也是相对论中子和离子源.

DPF 研究始于 20 世纪 70 年代初, 就其结构模式而言, 可分 Filippov 型和 Mather 型, 而后者为大多数实验室所采用. 其能源主要以电容器储能为主, 放电气体为氘气或氘氟混和气体, D-D 反应最高中子产额达到 10^{12} neutrons/pulse, 50—50 的 D-T 反应中子产额可达 10^{13} neutrons/pulse.

DPF 的简单工作原理为: 能源系统首先启动, 充电电源给储能装置充电至设定电压, 此时外触发信号启动触发装置, 产生前沿很陡的高压脉冲信号, 该信号导通储能装置的主放电开关, 储能电容器与焦点装置接通, 焦点装置开始工作, 经过约 2 μs 时间, 产生短脉冲、高强度的中子脉冲. 开关导通以后, 电容器对枪放电, 此时, 电容器、外电路和枪形成放电回路, 放电电流大体上应是一衰减的正弦波. 事实上, 枪内放电开始以后, 其内电感不是常数, 而是随着电流壳层向终端推移而逐渐升高, 所以电流波形并不是一个理想的正弦波形. 当焦点形成时, 由于电感的突然增加, 因而放电电流

收稿日期: 2004 - 08 - 31

* 基金项目: 中国工程物理研究院国防科技预研资助项目 (421030302)

作者简介: 郭洪生 (1961 -), 男 (汉族), 福建上杭人, 副研究员, 博士, 从事核辐射脉冲测量技术研究;

E-mail: ghongsheng@163.cn

突然下降的同时, 枪端电压也产生一个突然的跃变. 一般认为, 这种电流和电压在波形上的突变是有焦点形成的表现. 如图 1 中所示.

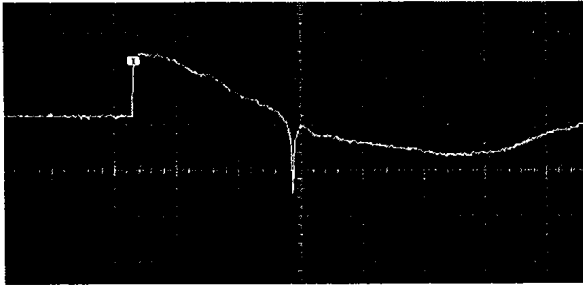


图 1 DPF 中子输出 dI/dt 波形
0.5 V/div, 1 μ s/div.

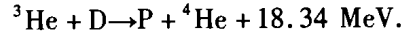
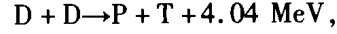
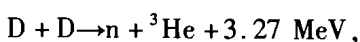
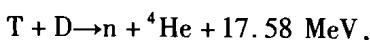
综上所述, 可以认为 PF 放电 (discharge) 时, 在同轴枪中的等离子体过程发生在 3 个基本段^[5]: (1) 枪后膛部的初始电离及电流的建立, 称为击穿段包括逆箍缩; (2) 轴对称电流层 (sheet) 滚雪球似的轴向加速, 称为加速或跑出段 (running down), 此时鞘沿枪轴运动; (3) 电流层的剧烈径向坍塌形成 DPF, 称为聚焦 (pinch) 或压缩段.

当在等离子体焦点充有适当的 D 或 T 气体时, 剧烈径向坍塌所产生的高温浓密等离子体将激发 $^3\text{H}(d, n)\text{H}$, $\text{H}(d, n)\text{H}$ 等反应产生中子.

DPF 释放中子的机理主要认为有两种, 即热核机制和束-靶机制, 束-靶机制为普遍认同的机制之一. 一种是束-靶反应机制, 即等离子体在力场的作用下, 有一部分离子被加速到高能状态 (几百 keV), 轰击另一部分等离子体, 发生聚变反应. 另一种机制是热核反应机制, 即等离子体在力场的作用下, 达到热动平衡的 Maxwell 分布, 离子挤压在一起, 相互碰撞产生聚变反应.

在某些焦点装置上, 得出的中子波形显示有两次发射中子的现象, 第一次产生的中子仅为全部中子产额的 10% 左右, 而后一次的中子产额占总量的 90% 左右. 前者被认为是热核机理的结果, 然而中子发射的方向性和瞬时各向异性却不足以支持热核机理, 故认为后者为束-靶机理的结果更加具有说服力.

热核机制的反应道为:



当离子 1 和离子 2 互相碰撞时, 就会发生聚变反应, 产生粒子 3 和粒子 4, 并释放出反应能 Q , 我们用 m_i 表示粒子的质量, 用 V_i 表示粒子在实验室系的速度, 其中 i 的取值为 1, 2, 3 和 4.

对于包含两种离子, 具有麦克斯韦离子速度分布函数的等离子体, 其分布函数 $f(V_1, V_2)$ 为

$$f(V_1, V_2) = f(V_1) f(V_2), \quad (3)$$

既为离子 1 和离子 2 两个独立的麦克斯韦分布的乘积, 其中 $f(V_1)$ 和 $f(V_2)$ 为归一化的麦克斯韦分布:

$$f(V_1) = \left(\frac{m_1}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m_1 V_1^2}{2kT}\right), \quad (4)$$

$$f(V_2) = \left(\frac{m_2}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m_2 V_2^2}{2kT}\right), \quad (5)$$

式中, V_1, V_2 为 V_1, V_2 的值; k 为玻耳兹曼常数; T 为等离子体温度.

即体系的麦克斯韦分布也等于离子对的质心运动和相对运动两个独立的麦克斯韦分布的乘积. 式中 $f(V), f(V_r)$ 为归一化的麦克斯韦分布.

$$f(V) = \left(\frac{m_1 + m_2}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{(m_1 + m_2)V^2}{2kT}\right), \quad (6)$$

$$f(V_r) = \left(\frac{m_1 m_2}{2\pi kT(m_1 + m_2)}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m_1 m_2 V_r^2}{2kT(m_1 + m_2)}\right), \quad (7)$$

利用分布函数式, 可以对任意函数 $\phi(V, V_r)$ 求平均值, 由此可得:

$$\langle V^2 \rangle = \int V^2 f(V) dV = \frac{3kT}{m_1 + m_2}, \quad (8)$$

$$\langle V_r^2 \rangle = \int V_r^2 f(V_r) dV_r = \frac{3(m_1 + m_2)kT}{m_1 m_2}, \quad (9)$$

质心动能 E_c 的平均值:

$$\langle E_c \rangle = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \langle V^2 \rangle = \frac{3}{2}kT, \quad (10)$$

相对运动动能 E_k 的平均值:

$$\langle E_k \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right) \langle V_r^2 \rangle = \frac{3}{2}kT, \quad (11)$$

热核反应率 R 为

$$R = n_1 n_2 \langle \sigma(V_r) V_r \rangle, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \langle \sigma(V_r) V_r \rangle &= \int V_r \sigma(V_r) f(V_r) dV_r \\ &= 4\pi \left[\frac{m_1 m_2}{2\pi kT(m_1 + m_2)} \right]^{\frac{3}{2}} \int_0^\infty V_r^3 \sigma(V_r) \cdot \\ &\quad \exp\left[-\frac{m_1 m_2}{2kT(m_1 + m_2)} V_r^2 \right] dV_r, \end{aligned} \quad (13)$$

若用相对运动动能 E_k 为积分变量, 则有:

$$\begin{aligned} \langle \sigma V_r \rangle &= \left[\frac{m_1 m_2}{\pi(m_1 + m_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \\ &\quad \int_0^\infty e_k \sigma(E_k) \exp\left[-\frac{E_k}{kT} \right] dE_k, \end{aligned} \quad (14)$$

把(14)式代入(13)式的右边, 利用鞍点法得^[3,4]:

$$\begin{aligned} \langle \sigma V_r \rangle &\approx 4AB^{\frac{1}{3}} \left[\frac{m_1 + m_2}{6(m_1 m_2)} \right]^{\frac{1}{2}} (2)^{\frac{3}{2}} (kT)^{-\frac{2}{3}} \cdot \\ &\quad \exp\left[-\left(3B^{\frac{2}{3}} 2^{-\frac{2}{3}}\right) (kT)^{-\frac{1}{3}} \right], \end{aligned} \quad (15)$$

热核反应的总产额:

$$Y = n_1 n_2 \langle \sigma V_r \rangle D \cdot \tau, \quad (16)$$

式中, n_1 和 n_2 是离子 1 和离子 2 的密度, σ 是核反应截面, D 是发生核反应的体积, τ 为核反应的持续时间.

参 考 文 献:

- | | |
|--|---|
| [1] Aliaga-Rossel R, Peter Choi. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(8): 84. | [4] Zakeullah M. Physica Scripta, 1996, 53(3): 447. |
| [2] Oks E P. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996, 21(4): 938. | [5] Herold H, JaGer U L, Price D F, et al. Experimental Studies of Dense Magnetigod Plasma Produced by PF - type Discharge Proc 11th Europe Conf Aachen, 1983, Part I, 1983, 477. |
| [3] Lee S S. IEEE Transaction on Plasma Science 1996, 24(3): 223. | |

Study of Machinsm of PF Neutron Poducing on Z-pinch *

GUO Hong-sheng, HE Xi-jun, PENG Tai-ping

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Using the machanism of beam-target and heat-nucleus, the scaling relationship between the neutron yields of denser plasma focus and the PF plasma current is deduced. The principle is brief discussed with denser plasma focus(DPF) as the neutron generator. We have introduced some factors that influnce the DPF discharging to produce neutron yield and some methods that improve stability of neutron yields on the denser plasma focus (DPF).

Key words: denser plasma focus; neutron generator; stability of neutron yield; switch