第 21 卷 第 3 期
2004 年 9 月

原子核物理评论
Nuclear Physics Review

Vol. 21, No. 3
Sep., 2004

文章编号：1007－4627(2004)03－0214－04

影响 DPF 焦点装置中子稳定性的因素和改进措施*

郭洪生[1]，李恩平[2]，何锡钧[1]，彭太平[1]，冯　春[1]

(1 中国工程物理研究院核物理与化学研究所，四川 绵阳 621900；
2 中国工程物理研究院机械制造研究所，四川 绵阳 621900)

摘　要：简要叙述了稠密等离子体聚焦装置作为中子发生器的工作原理，对影响稠密等离子体聚焦装置放电出中子产额及其稳定性的一些因素和改进措施进行了简单讨论. 通过使用不同电极形状的场畸变开关很好地提高了焦点装置的运行，使装置输出中子的起伏得到明显的改善. 通过对腔内电极的清洁，在不更换气体的条件下，聚焦装置放电出中子产额稳定.

关 键 词：稠密等离子体焦点装置；中子发生器；稳定性；开关

中图分类号：TL81；O571.2　　**文献标识码**：A

1　引言

20 世纪 50 年代，美国 LANL 实验室的 J. M. Mather 和前苏联库尔卡托夫原子能研究所的 N. U. Filippov 最先独立研制成功等离子体聚焦装置(DPF)[1,2]. DPF 是一种等离子体放电，焦点等离子体密度高达 10^{19} plasmas/cm^3，温度达几个 keV，延续时间约 100 ns. 它是强脉冲中子源和强 X 光源，也是相对论中子和离子源. 随后很多著名实验室加入 DPF 的研究行列，主要集中在美国 Los Alamos Scientific Laboratory，Sansia-Albuquerque Aerospace，Physics International(PI)和前苏联、德、英、意等国. DPF 的结构模式可分为 Filippov 型和 Mather 型，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氚混合气体，D-D 反应最高中子产额达到 10^{12} neutrons/pulse，D-T 反应中子产额可达 10^{13} neutrons/pulse.

Mather 型焦点装置与 Filippov 型焦点装置的区别在于装置的内、外电极的相对尺寸不同，而且 Filippov 型焦点装置没有等离子体电流鞘的加速段. 另外，Filippov 型焦点装置不及 Mather 型焦点装置的电极系统紧凑，对所选定的同一电容器储能 w_0，中子产额 Y_n 值偏低，而且各枪间的起伏较大.

DPF 的简单工作原理为：启动能源系统给储能装置充电至设定电压，此时启动触发装置产生前沿很陡的高压脉冲信号，通过该信号导通储能装置的主放电开关与焦点装置接通，焦点装置开始工作；在焦点形成时刻，等离子体被压缩成细长的等离子体柱，该等离子体柱由于 $m=0$ 的不稳定性等因素而被拉裂，致使阻抗陡增，放电电流骤降，在波形上反映为电流的骤减，形成负尖峰和台阶，dI/dt 有一细长尖峰. 实验证明，电流的骤减形成负尖峰越长，台阶越大，则 dI/dt 尖峰越突出，那么表明聚焦越良好，中子产额也就越高.

从以上所述，可以认为 PF 放电时，在同轴枪中的等离子体过程发生在 3 个基本段[1]：(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)轴对称电流层雪耙似地轴向加速，称为加速或跑出段，此时鞘沿枪轴运动；(3)电流层的剧烈径向坍缩形成 DPF，称为聚焦或压缩段.

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

利用一维雪耙(snow plot)模型可以粗略地描绘电流壳层的动力学行为[2]，能算出为使聚焦发生在电流最大值时刻的电容器充电电压 V_0 和枪内起始充气密度 ρ_0. 雪耙模型认为：放电气体被击穿后形成的等离子体壳层在电磁力的作用下，像活塞或

收稿日期：2004 - 04 - 08；**修改日期**：2004 - 07 - 27

* **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.

"雪耙"一样地沿轴向运动，将所遇到的中性气体都电离为等离子体，并堆积在壳层里面，同壳层一起运动.

在计算中，假设电流壳层是轴对称的，把这一电流壳层分割成许多单位宽度的圆环，并忽略各面元之间的相互作用，那么根据雪耙模型，对于半径为 r_0 的圆环，其轴向运动方程为[3]

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(2\pi r_0 Z\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\right)=2\pi r_0\frac{\mu_0}{2}\left(\frac{I(t)}{2\pi r_0}\right)^2, \qquad (1)$$

式中，$I(t)$为放电电流，μ_0 为真空磁导率.

把实验中测得的电流曲线参数代入上面的方程进行数值积分，就可以得到对于一定的 r_0 值，电流壳层在每一时刻 t 的位置和速度. 改变 r_0 值，就可以得到整个电流壳层在两极间的运动情况. 图 1 为计算结果，它给出了电流壳层在不同时刻 t 的位置. 从图 1 中可以清楚的看到，在电击穿后 3.4 μs，电流壳层被推到中心电极的末端. 此时，电流达到了它的峰值，这一点与实验结果符合得相当好[4].

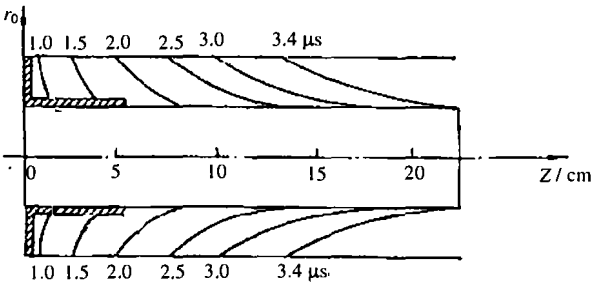

图 1　一维雪耙模型所计算的电流壳层剖面图

2　影响焦点装置放电出中子的因素

2.1　高压运行对中子产生的影响

当 DPF 装置在相同储能条件下高压运行时，它有如下特点[3—5]：(1) 固定储能时，高压允许高电容阻抗，减弱了等离子体焦点负载电抗变化对放电电流的影响；(2) 固定储能时，高压下获得的更大电流将导致更多的中子产额或其它产额；(3) 高压运行增大了传给鞘形成的能量，产生高质量的鞘，因而得到高质量的焦点；(4) 对快速高压组，聚焦发生很快，以致鞘没到达外电极的柱墙，这可减少由外电极内表面向等离子体释放杂质，因而使等离子体更干净，且降低反复点火的可能性；(5) 对给定的电容组能量，高压允许低组电容和高响应频率，这给控制等离子体的不稳定性提供了机会.

有实验研究表明，在工作电压足够高时，随着气压的升高，放电室内将出现几种不同的击穿模式：低气压时是顶部击穿，即在内电极顶部的内、外电极之间直接击穿. 在中气压时是沿面击穿(gliding discharge)，绝缘子表面击穿；高气压时是弥漫击穿，在绝缘子上部内、外电极之间大面积击穿；沿面击穿可以在绝缘子表面形成均匀的电流鞘层，它是导致最后良好聚焦的必要条件，而顶部击穿和弥漫击穿均不可能导致聚焦. 若气压偏高，即使击穿阶段在绝缘子表面形成了均匀的电流鞘层，该鞘层也难以驱动其前方的全部气体前进，同样不能聚焦. 初始放电时，在绝缘体上形成对称电流鞘，但如何确定绝缘体的最佳长度这一问题至今尚未得到系统研究，同时内外电极尺寸、布局、绝缘体材料及其结构及初始压强等参数之间的关系十分复杂，至今尚未有普遍关系. 有研究表明，在获得环向对称电流鞘的套筒长度的最佳选择时，任何对此选择的偏离都将导致在套筒表面上产生幅条形电流.

2.2　D 气体充压对中子产生的影响

在 D-D 反应中，焦点装置放电所产生的中子产额与箍缩电流的关系式为

$$Y \propto I^{\alpha}, \qquad 4<\alpha<5 \qquad (2)$$

虽然这个定标关系在每个 DPF 装置中都适用，但它只在一定的气压范围内适用，即有一个上限气压 p_M 和下限气压 p_m. 实际上，超出这个气压范围，即使箍缩电流 I 的变化不大，而中子产额 Y 却下降很多. 有关气压上限的解释是在径向压缩期间的电流雪鞘离子化中性气体的能力，而下限气压的解释是：在焦点装置放电阶段，在获得最佳中子产额的 D 气压条件下，磁活塞(MP，即等离子体-磁场相互作用表面)和电流鞘离子化前端面(IF，即等离子体-中性气体相互作用表面)有相似的表达式 $\tau(t)$，在整个压缩段电流鞘厚度保持一个常数(0.2 cm). 而在低气压阶段，在径向压缩阶段电流鞘的厚度较小(约为 0.1 cm)，而且在最后的 35 ns 时间内，IF 以 7.5×10^7 cm/s 的速度超越 MP 向前运动，这个 IF 的突然加速就是导致低工作气压状态下中子产额降低的一个主要因素. 这个电流雪鞘实际上是一个被强烈离子化的冲击波.

实验表明，当装置结构固定的情况下，氘气的

压力和放电电压是影响中子产额的两个主要因素. 气压很低($p\leqslant 300$ Pa)时，放电过程中形成在电极顶部的内、外极之间直接击穿，即顶部击穿. 此时，在低电压的情况下，DPF 能够聚焦，但由于能量小，而不能输出较高产额的中子；在较高电压时，DPF 由于顶部击穿而不能聚焦. 气压在介于低压和最佳气压之间(300 Pa$\leqslant p\leqslant$400 Pa)时，聚焦不稳定，中子产额也不稳定，这是由于放电室处于顶部击穿和沿面击穿的过渡状态的缘故. 在最佳气压(400 Pa$\leqslant p\leqslant$600 Pa)时，DPF 聚焦良好，输出产额稳定的快中子，此时放电室处于沿面击穿的过程. 当氘压在高气压($p>$600 Pa)时，DPF 聚焦程度不好，甚至不聚焦，其原因可能在于放电室在高电压时的弥漫击穿或在低电压时的能量过小.

总之，气压对中子产额 Y 的影响具有以下特征：(1)显著的 Y 值只在界限分明的充 D 气压(p)范围内探测到；(2)只改变 p 值时，有一个 $p=p_M$ 使 Y 达到最大值，不同装置 p_M 的变动可大于一个数量级；(3)一般情况下，$p>p_M$ 时 Y 急剧下降，表现出一种截止特征；(4) $p\geqslant p_M$ 时 Y 的降低不能由焦点中电流 I_f 的减小来解释. 事实上，大多数实验中 Y 随 p 的增大而减小($p>p_M$)时，而 $I_f p$ 增大.

2.3 中心电极 CE 对中子产生的影响

一般说来，最小的中心电极(CE)产生最高的中子产额. CE 直径太大有可能不产生中子，因为太大的 CE 直径的径向箍缩会占去 DPF $\tau/4$ (τ 为装置放电周期)太多时间，而一般认为放电回路的 1/4 周期时间应与等离子体聚焦达到最大收缩的时间相当. 当中心电极 CE 直径太小时，升举前的高电流密度对中心电极的破坏与箍缩时的退化使箍缩动力学之间的平衡不能得到保证[5]，而太小的 CE 不能形成等离子聚焦(PF)的经典尺寸. 还存在利用小 CE 直径的另一面，电流强度和磁场的大小在小 CE 直径时更大，从而使升举时间减少. 然而，实验表明，假如升举前电流密度太高，在绝缘体端头附近区域 CE 发生明显气化，有时绝缘体被破坏，由鞘所形成的环向对称性也被破坏，没有聚焦.

但运用小电极直径也有好处，它可在击穿前在电极附近产生更高的电场，提高鞘的质量，在电极附近可能产生更大的磁场和电流密度，通过洛伦兹力导致更快的鞘升举，从而减轻与热鞘接触时的绝缘材料对鞘的沾染. 由于电子束轰击、等离子体电极气化、脉冲磁压及从箍缩区射来的轴向气流等的作用，箍缩本身也会破坏 CE.

3 提高 DPF 中子产额稳定性的措施

一般说来，影响装置放电出中子的因素有放电、枪结构、电容器储能、靶室充气气压、工作电压和腔内清洁等. 目前，我们还不能确切地说通过调整哪一个因素能显著的改进装置性能，只能通过大量实验进行摸索，调整装置参数，以使 DPF 外中子源工作在最优状态. 经过摸索，DPF 装置目前的工作条件为：储能电容 40 μF，充电电压 25 kV，电容器储能 12 kJ，回路电感约 30 nH，放电电流幅值约 480 kA，内电极半径 5 cm，外电极半径 12 cm. 当装置运行在这样的工作条件下时，中子产额可达到约 1×10^9 neutrons/pulse，中子脉冲波形半宽度为 30—40 ns，基本上可以满足使用要求.

3.1 场畸变开关研究

在焦点装置中，开关是把电容器的能量有效地传送给 DPF 的关键部件. 实验表明，DPF 输出中子的时间抖动主要是开关的导通抖动引起的，在要求低抖动时往往带来过高的自击穿率.

开关的导通性能与很多因素有关，如开关工作的欠压比、触发脉冲的幅度与上升时间、开关电极形状、加工精度及绝缘气体等. 为保证 DPF 输出中子时的可靠运行，我们开展了场畸变(FDE's)开关性能的系统研究，先后使用了 4 种电极形状和 6 种绝缘气体进行了多次实验. 在使用环形电极、75% SF_6+25% N_2、欠压比 60%—90%工作范围内，以及使用 75% SF_6+25% Ar，可以很好地提高焦点装置的可靠运行. 在每轮实验中，装置输出中子的起伏由过去的约两个量级到目前基本上可以满足实验对装置的使用要求.

3.2 腔内清洁

通过对 DPF 工作原理的研究及相关实验，DPF 腔体内电极表面的清洁程度是影响其稳定可靠工作的关键因素之一. 有研究表明，杂质对中子产生有明显的影响. 其表现为每一次新的(纯 D 气体)充气，第一次放电的中子产额都比较低，而总是

在第二第三次放电时才有较高的中子产额，这显然是因为有了一、二次放电，枪内已经由于出气掺进了某种杂质的缘故. 这些杂质在真空中会放出大量的杂质气体，而且当 DPF 工作时，还会气化而进入等离子体，随后重新凝结或吸附在电极和陶瓷表面，极易导致初始放电不均匀，并在等离子体中引入大量的杂质离子.

因此，为提高 DPF 中子管的稳定性和可靠性，我们从改善初始放电入手，采用了场变形放电单元，增强击穿前的场强，提高初始放电的可靠性和所形成的等离子体层的性能，并利用先进的特种电真空工艺，对管内部件进行了较为彻底的处理. 真空室的材料以及阴阳极和其它部件的材料自身含有微量的杂质气体. 在对真空放电室进行放电时，这些材料受到等离子体束流的轰击或由于大电流高功率脉冲的作用下，这些杂质便游离进入放电室影响 DPF 的聚焦，从而减少中子产额甚至致使多次聚焦. 为消除这一现象，采用烘烤真空室并循环抽真空清除杂质. 我们采用的烘烤系统在 300 °C 左右对真空室进行烘烤除杂质，收到良好的效果，并大大地缩短了装置正常运行前的时间.

处理后的密封件，在经过放电实验后出气量极少，能满足放电 100 次以上不清洁、不更换气体的要求，在经过了一段相当长的时间考验，中子产额无明显下降，首次中子产额能满足实验要求.

4　结论

由于氘气的纯度对中子产额和 X 光辐射产生很大的影响，通过采用上述措施对真空室进行烘烤除杂质非常必要. 大量的实验及理论可以证明，场畸变元件可以有效增加装置放电时电流鞘的质量、离子束结构的精细化、有效消除在高密度电流鞘后面的电流扩散影响和提高中子输出的稳定性. 场畸变开关的研究使焦点装置的中子产额稳定性有了很大的提高，基本上可以满足使用要求.

致谢　感谢高顺受研究员、封树平副研究员的有益讨论，感谢 DPF 运行小组的大力协作.

参 考 文 献：

[1] Aliaga-Rossel R, Peter Choi. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, **26**(4): 84.

[2] Herold H, Jager U, Sahlin H. Proc 11th Europe Conf Aachen, 1983, Part I: 477.

[3] Oks E. IEEE Transactions on Plasma Science, June-1996, **21**(4): 938.

[4] Lee S. IEEE Transaction on Plasma Science, 1996, **24**(3): 223.

[5] Zakeullah M. Physica Scripta, May-1996, **53**(3): 447.

Method of Stability of Neutron Yields on Denser Plasma Focus*

GUO Hong-sheng[1], LI En-ping[2], HE Xi-jun[1], PENG Tai-ping[1], FENG Chun[1]

(1 *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang* 621900, *Sichuan, China*;

2 *Institute of Machine Manufacture, CAEP, Mianyang* 621900, *Sichuan, China*)

Abstract: The principle of dense plasma focus(DPF) as neutron generator has been investigated in this paper. We have stated briefly some factors that mainly influnce the DPF's neutron yield and some methods improving the stability of neutron yields on the dense plasma focus. It is showed that the fluctuation of DPF output neutron becomes smaller by using different types of field-distortion elements. Over 100 consecutive shots without purging the test gas the neutron yields has no obvious change.

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

* **Foundation item**: Pre-study of National Denfence and Science Technology of CAEP(421030302)