

场反向角收缩等离子体实验 (FRP-1)

叶茂福 吴成 张宝珍 李银安

(中国科学院物理研究所)

场反向角收缩等离子体, 是一种轴向拉长的轴对称非圆截面环形位形的紧凑环等离子体^[1], 通过位于直管中等离子体柱内捕获的反场磁力线与外场磁力线连接而建立. 其特点是 β 值较高, 线圈结构简单, 等离子体形成、加热和燃烧区分开. 这种新近发展起来的磁约束途径, 已取得了较大的进展^[2].

一、装置 (FRP-1) 工作原理

直径为 12 cm 的石英放电管外围着直径为 13 cm、长为 55 cm 的单匝主放电线圈, 分为八段, 两端分别设置触发场、磁镜场和射频预电离线圈. 线圈外均布八对关联的多极场绕组 (图 1).

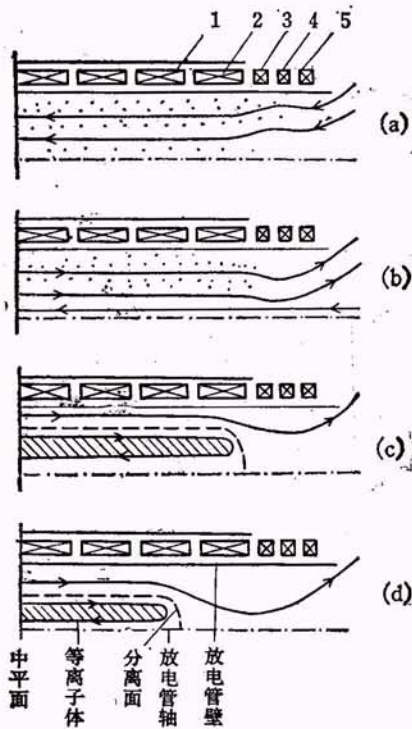


图 1 FRP-1 装置及等离子体形成过程示意

(a) 电离; (b) 爆聚; (c) 闭合; (d) 收缩

FRP-1 等离子体建立过程如下: 1MCHz 射频源使放电管中气体电离. 在偏磁场和镜场电容器组分别

对主放电和镜场线圈放电接近最大值时, 预加热电容器组对主线圈放电, 产生低温等离子体 [图 1(a)]. 这时施加与偏磁场方向相反的主压缩场, 使管壁附近感生一等离子体电流层, 并向着管轴爆聚 [图 1(b)]. 此时, 捕集在电流层内的部分反向偏磁场在线圈端部与主场连接, 形成磁力线闭合的柱形等离子体环 [图 1(c)], 接着发生轴向收缩, 进入平衡位形 [图 1(d)]. 镜场的存在加强了力线的连接作用. 在 FRP-1 中, 镜场与主场的线圈分开, 独立供电, 使装置较为灵活, 既可调节磁镜比, 也可产生会切场. 调节触发场的放电时刻可以控制磁力线强迫再连的时刻, 引发等离子体轴向收缩 (此系统尚未使用). 多极场的作用是防止等离子体在主场过零时碰壁, 避免杂质污染和抑制 $n=2$ 旋转不稳定性. 各场放电的时间程序由多级触发延迟系统完成.

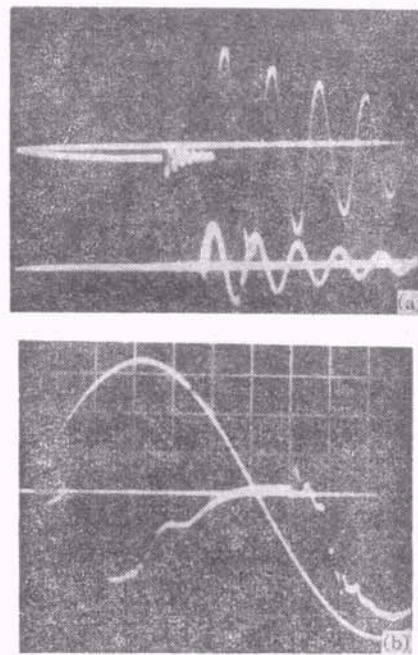


图 2 (a) 各场的放电示波图 ($10\mu\text{s}/\text{格}$), 上线: 依次为偏磁场加镜场、预热场、主压缩场 (磁探针测得), 下线: 多极场, 罗氏线圈测得; (b) 等离子体内部捕集了反向磁场

表 1 FRP-1 的主要电参数

	偏磁场	预热场	主压缩场	多级场	镜场	触发场	预电离场
$E(kJ)$	18.8	0.7	30	15	22.5	15	1 MHz 射频源
$V(kV)$	5	55	45	45	5	45	
$B(kG)$	1.3	/	16	0.6*	5	/	
$T/4(\mu s)$	45	0.5	3.1	2.8	63	4.8	

* 放电管内壁处。

二、实验结果与讨论

利用位于放电管中平面上的磁探针，测量了磁场的径向分布及其随时间的变化过程。探针沿径向移动，每隔 5 mm 取一个测量点。各点的数据是重复三次放电的均方根值。探针线度为 $\phi 1.6 \times 2 \text{ mm}^2$ 。实验在三种条件下进行：(1) 主场 $B = 7.5 \text{ kG}$ ，反向偏磁场 $B_0 = 450 \text{ G}$ ；(2) 7.5 kG ， 700 G ；(3) 5 kG ， 700 G 。其他条件相同，即预加热场、镜场、多级场的电容器组放电电压分别为 55 kV ， 2.5 kV 和 14 kV ，放电前预加 1 MHz 射频源。工作气体为氢，气压 $17 \mu\text{Hg}$ ，本底真空 $8 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ 。实验集中研究了主场放电上升阶段场反向位形等离子体的动力学过程。图 2 (b) 是等离子体内部捕集反向磁场的典型示波图。图上的正弦波形是在相同放电条件下但没有等离子体时的主场波形。

由一系列示波图可求出各个时刻的磁场径向分

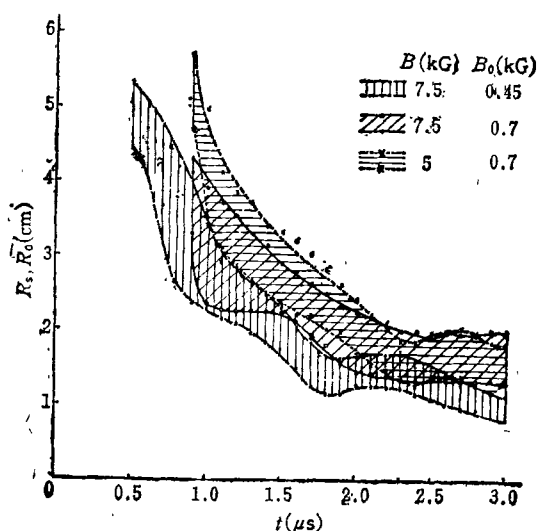


图 3 R_s 和 R_0 随时间的变化

布，进而求出分离面半径 R_s 和中性面半径 R_0 随时间的变化情况(图 3)。 R_s 定义为

$$\int_0^{R_s} B(r) 2\pi r dr = 0, \quad (1)$$

R_0 为 $B = 0$ 处的半径。由图 3 可见，等离子体的动力学过程大致分为三个阶段(以 7.5 kG ， 450 G 一组数据为例)：在 $0.8 \mu\text{s}$ 以前，主场上升较快， R_s 和 R_0 迅速变小，表明等离子体电流层向管轴爆聚，推进速度约为 $3.3 \times 10^6 \text{ cm/s}$ ，马赫数 $M = 1.65$ 。主场则以 $2.1 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 的速度向着等离子体内部渗透，并逐渐减慢。这是弱激波加热阶段，此时闭合的磁场位形已经形成。此后，主场上升速率变慢，向管轴的推进速度也相应变慢，约为 $4.7 \times 10^5 \text{ cm/s}$ ，激波消失，进入绝热压缩阶段。在 $1.9 \mu\text{s}$ 附近等离子体截面有一次膨胀，尔后缓慢地单调压缩，可认为已进入平衡阶段了。此时局域 $\beta \sim 0.7$ 。

由图 3 还可看出，主场较小而偏场较大 (5 kG ，

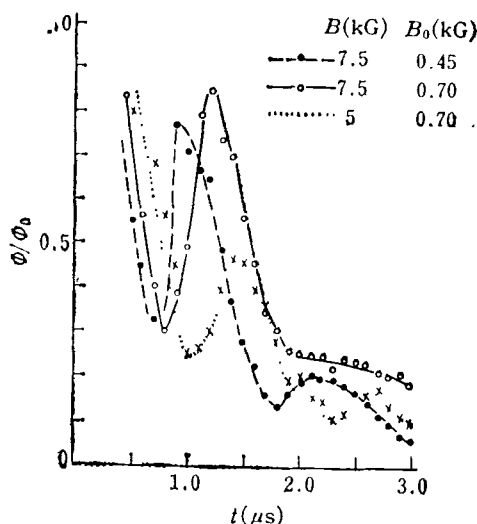


图 4 Φ/Φ_0 随时间的变化(比值已归一化)

(下转第 485 页)