

# CT-6 托卡马克研究 (II)\*

## 物 理 实 验 结 果

中国科学院物理研究所一〇四组

### 提 要

本文报道了 CT-6 托卡马克装置在四万多放电实验过程中观察到的现象和从大量数据中得到的一些规律性。这些实验结果分属于：平衡稳定等离子体的获得，等离子体形成阶段的特性，杂质和等离子体壁相互作用等几个主要方面。

文献 [1] 中描述了 CT-6 托卡马克装置的总体结构以及与工程研制和调试有关的实验结果。本文主要描述和讨论装置正常运行之后观察到的一些现象及做的一些物理实验结果，并提出它们可能的物理过程的解释。

CT-6 托卡马克装置的典型运行参数如下：

大半径	$R$	45cm
等离子体柱半径	$r$	$< 9.2\text{cm}$
环向磁场	$B_T$	12kGs
环电流	$I_p$	30kA
磁通变化量	$\Delta\phi$	0.28Wb
极限真空		$8 \times 10^{-8}\text{torr}$
工作气体		$\text{H}_2$
工作气体压强		$\sim 5 \times 10^{-4}\text{torr}$

在实验中采用的测量手段有：电磁测量（包括等离子体环电流  $I_p$ ，环电压  $U_p$ ，位移等）；软 X 射线吸收比较法测量电子温度；闪烁晶体法测量硬 X 射线的强度；质谱计测量放电室内剩余气体的成分；光谱仪记录可见光及紫外区的光谱线强度。

### 一、获得高温、平衡、稳定等离子体的基本条件

与其它托卡马克装置的结果类似<sup>[2]</sup>，在 CT-6 上要获得高温、平衡、稳定的等离子体要有三个条件：（1）具备良好的真空条件，要求放电室的器壁干净，保证在放电过程中等离子体的杂质水平较低。（2）仔细控制影响等离子体柱整体运动的横向磁场的大小及形态。（3）控制和调整外电气迴路的参数，达到最佳的放电条件。

\* 1979年3月10日收到。

努力调整和改善上述三个条件之后,我们得到如下的典型结果: 等离子体环电流为 30kA, 峰值电流时环电压  $U_p$  约为 2V. 放电维持时间为 15ms. 如果有效电荷  $Z_{\text{eff}}$  取 1, 利用文献[3]的公式, 由电阻率计算等离子体电导温度为 250eV. 实际的  $Z_{\text{eff}}$  大于 1, 因而实际电导温度高于此值. 由软 X 射线吸收比较法测得的电子温度稍高于上面数值. 如果等离子体的密度按初始工作气压估计 ( $3 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ ), 那么能量约束时间  $\tau_E$  约为 2ms. 在较低环电流值 ( $I_p = 14\text{kA}$ ) 的条件下运行, 放电维持时间可达 30ms. 图 1 为典型放电示波图.

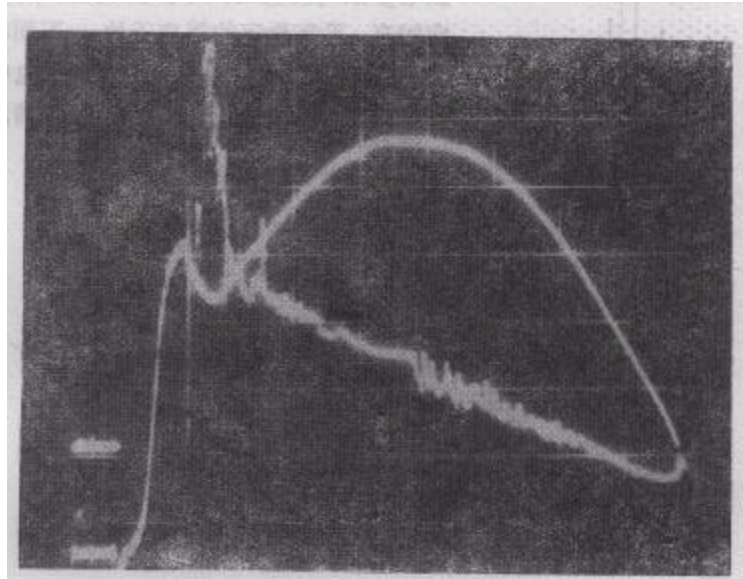


图 1

上线: 环电压每格 2V;  
下线: 环电流每格 5.5kA;  
时标: 每格 2ms

由于结构的限制, 按装好的真空室只能在较低温度下 ( $\sim 250^\circ\text{C}$ ) 烘烤. 因此, 清洗放电成为器壁处理的主要方法. 清洗放电就是为了清洗真空室器壁进行的低纵场高环电压的放电. 由于这种放电中等离子体的约束比较差, 这就达到更好地轰击器壁的效果.

装置在放电时, 等离子体内部粒子与器壁中释放出的粒子发生强烈的交换. 没有经过很好处理过的器壁, 在放电过程中被快速粒子轰击放出大量杂质粒子, 从而冷却等离子体, 并严重影响它的平衡和稳定. 实验表明, 暴露过大的真空室, 如果没有经过几千次的清洗放电是不能获得平衡、稳定、高温的等离子体.

图 2 给出真空室在清洗放电的不同阶段剩余气体质谱图. 从图 2 看出清洗放电对去掉器壁吸附的油分子 ( $M/e > 40$ )、水分子 ( $M/e = 18, 17$ )、二氧化碳 ( $M/e = 44$ ) 及一氧化碳 ( $M/e = 28$ ) 是有效的. 放电后甲烷含量的大量增加是由于工作气体氢与不锈钢器壁中的碳在经放电处理过的表面催化下不断合成的结果. 这样看来清洗放电对清除碳杂质是有利的. 但是, 可能是由于器壁材料中碳成分相当多, 致使在清洗放电后期, 器壁被认为相当干净时, 放电后仍能生成大量甲烷.

我们还发现在清洗放电中产生大量的水及一氧化碳, 但其中大部分在放电结束之后

几十毫秒之内消失。说明它们被器壁吸附回去。可见清洗放电虽可清除该类杂质，但效率不是最理想。

随着清洗放电次数的增加，所有 OII, CII 光谱线的强度明显下降。这和上述结论一致。

只有经过相当次数的清洗放电之后才有可能增加放电的持续时间。这时增加环向磁场，适当调整放电参数与垂直场大小，可以获得维持时间较长、温度较高、平衡稳定的等离子体。下面称这种条件的放电为正式放电。图 3 给出正式放电中电流峰值时的电导温度(计算时取  $Z_{\text{eff}}=1$ ) 与清洗放电次数的关系。

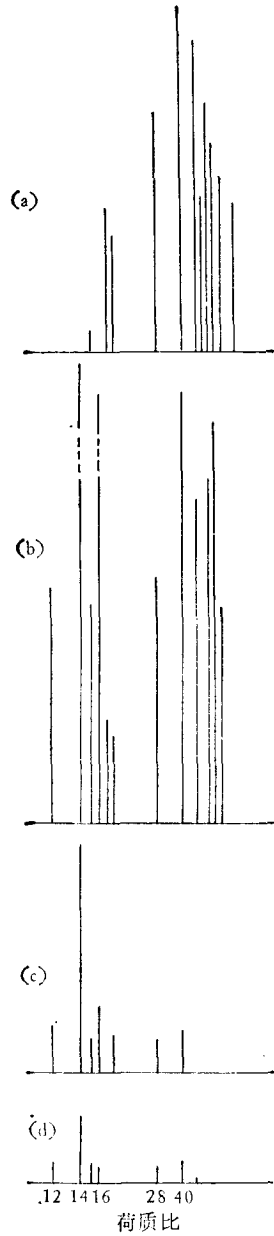


图 2

	(a)	(b)	(c)	(d)
清洗放电次数	0	430	800	1200
真空度 ( $10^{-6}$ torr)	10	40	6	6

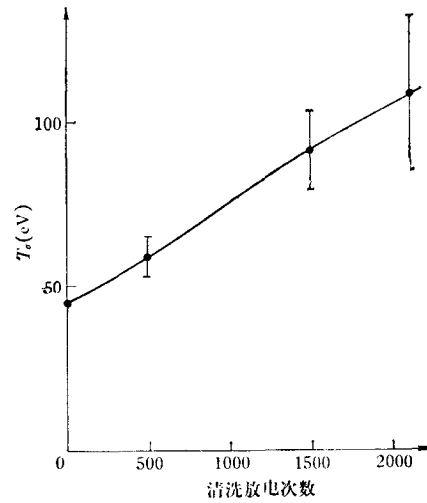


图 3

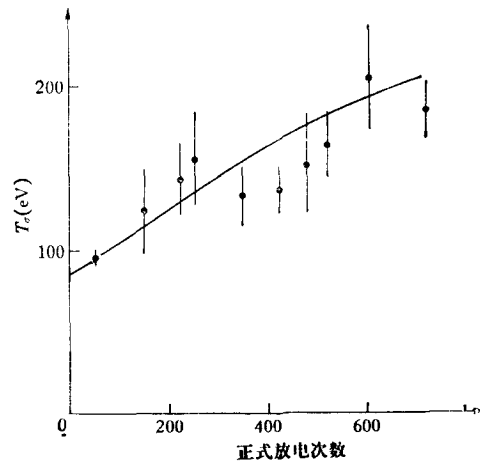


图 4

由于清洗放电和正式放电轰击器壁的区域不相同,因此器壁经清洗放电之后仍然需要按正式放电的条件进行清洗,才能得到电流较大、温度较高的放电,同时,结果重复性大大改善.图4给出正式放电中电导温度与放电次数的关系.

我们的实验结果表明,为了获得高温、平衡、稳定的等离子体,对横向磁场的要求主要有:

1. 在放电开始时刻要求垂直于环向磁场的横向磁场尽可能小.如果大于环向磁场的0.3%,气体击穿比较困难.同时要仔细地消除水平方向的横向磁场,减少放电之后等离子体柱的上下运动.

2. 气体击穿之后,外加垂直场应随着等离子体环电流的增加而增加.无外加垂直场的放电是不理想的.典型结果如图5.电流值单调下降表明等离子体柱在轴外侧形成,并且单调地向外侧移动.实验表明,由于铜壳的作用,对外加垂直场的形态、大小及与等离子体电流的匹配和跟踪程度的要求并不严格.事实上,CT-6能提供的最大垂直场也要比完全平衡等离子体柱所需的垂直场少一倍,而且其数值在很宽的范围之内变化,对电流的峰值及电导温度均无明显影响,只是影响电流峰值出现的时刻.其原因是由于铜壳的作用,在不大的外加垂直场作用下,等离子体柱初始形成位置在轴内侧,由于垂直场偏小,因此在向外运动过程中,某一时刻处于最佳位置,得到最大的电流及温度.

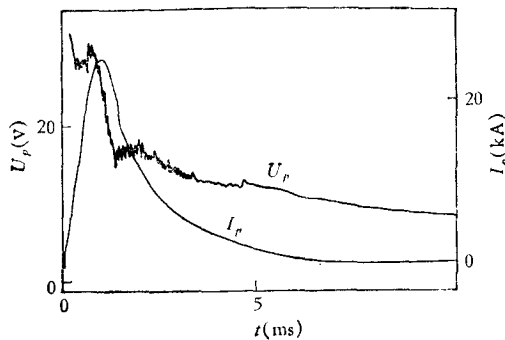


图 5

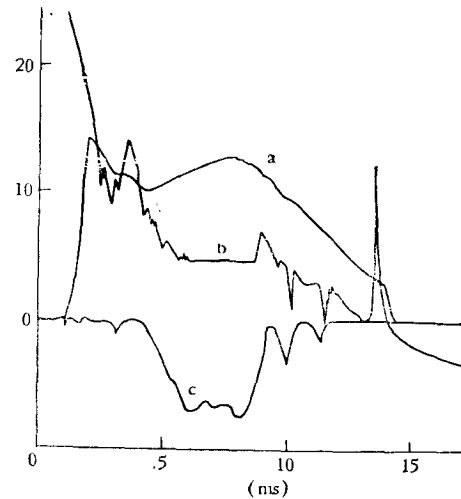


图 5 不稳定放电示波图

a 为环电流每格 1.9kA;

b 为环电压每格 1V;

c 为软 X 射线任意单位

我们的涡旋场是由两组电容器供电.电气回路的调节主要是指仔细调节两组电容器的充电电压及第二组电容器接通时刻的延迟.电压偏低会使放电电流变小而减小欧姆加热的功率,致使等离子体温度偏低.当充电电压较高时,等离子体环电流增长到对应 $q_u = 3$ 时,常常出现强烈的MHD不稳定性,使电子温度大大下降.这时软X射线辐射强度大大变弱.典型结果如图6.一般地说,遇到上述不稳定性时,电流值下降,并且很快消失.但是经过长期放电清洗之后,可能出现第二个峰值,见图7.

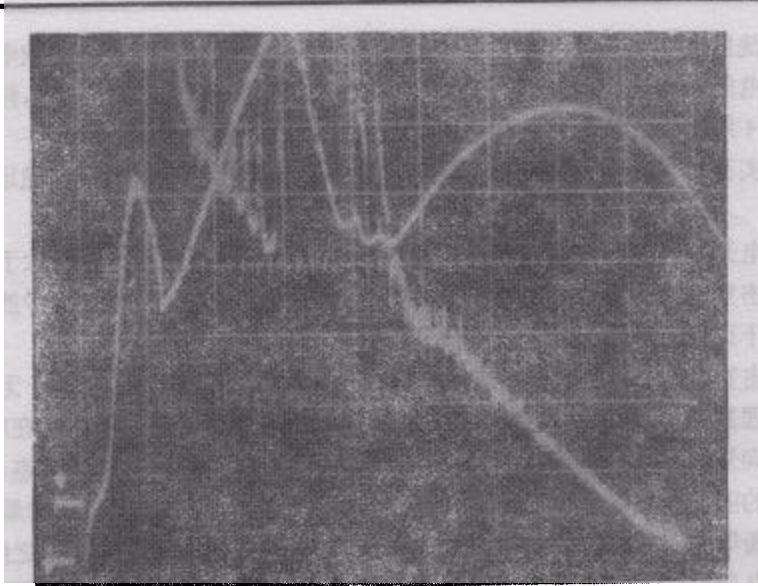


图 7

上线: 环电流每格 5.5kA;  
 下线: 环电压每格 2V;  
 时标: 每格 2ms

## 二、清洗放电环电流示波图的演化

如上所述,清洗放电清洗真空室器壁的机构,总的说来,是利用放电形成大量粒子轰击器壁,使吸附的杂质释放出来而被抽走。器壁状况的改变将影响放电特性。因此研究不同阶段放电特性的变化是很有意义的。从大量的实验结果中我们发现: CT-6 装置中

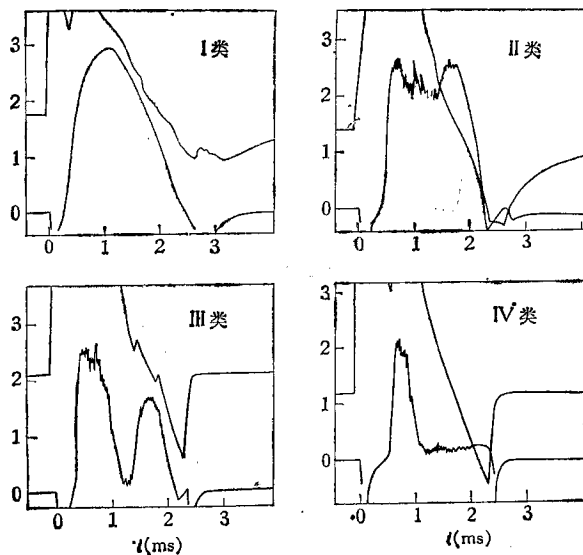


图 8 C 放电波形分类图

上线: 环电压每格 50V; 下线: 环电流每格 4.2kA

清洗放电环电流示波图遵循一个重复性很好的演化规律。

清洗放电的实验条件如下:环向磁场 1.5—2.5kGs, 涡旋场电压每匝 100—200V, 电源供电维持时间约 2ms, 以下称这种特定条件下的清洗放电为 C 放电。C 放电环电流示波图的变化是多样的,按其“进化阶段”大致可分为四类,分别称其为 I, II, III, IV 类(见图 8), 各类有如下特点。

I 类: 它出现于真空室暴露了大气再次抽真空之后的放电, 此时示波图近似于正弦波半周期, 电流的峰值和维持时间与环向磁场大小无关, 几乎只与环电压及变压器原边电流维持时间有关, 不受安全因子  $q(a)$  的限制, 在我们特定的实验条件之下  $q(a)$  值可达 0.2, 波形几乎和工作气压无关。

II 类: 环电流增加到一定数值之后, 不再增加, 维持一个平台, 但带有很多的“毛刺”, 平台一直维持到环电压消失, 与 I 类不同, 平台电流值与充气气压、环电压无关, 由纵场大小决定, 如果取隔板半径为等离子体柱半径, 那末它相当于  $q(a) \cong 3$  的数值。

III 类: 它与 II 类的区别是环电流示波图的中部有一个凹陷, 开始放电之后维持不到 1ms 就突然截止, 但稍后时刻又接着出现第二次放电, 峰值电流大小与 II 类类似, 基本上对应  $q(a) = 3$  的数值。

IV 类: 它与 III 类区别在于不再出现第二次放电, 电流维持约 0.5ms 就突然截止, 尽管仍然维持很高的环电压, 但是等离子体柱却不再电离。

某一次 C 放电波形归类是偶然的, 但是在清洗放电的一定时期, 各类波形出现的几率是一定的, 真空室暴露了大气之后, 再次运行必须经过清洗放电, 而整个清洗放电的过程同时也是 C 放电波形出现几率从第 I 类向第 IV 类过渡的过程, CT-6 的实验结果表明: 只有当第 IV 类放电波形出现几率占压倒优势时, 才有可能获得维持时间较长、参数良好的等离子体。

图 9 为清洗放电过程中各类波形出现的几率与放电次数的关系, 由于放电前真空室比较干净, 因此 I 类出现很少。

真空室对各类波形出现的几率有长期的“记忆能力”, 即装置停止运行相当一段时间之后, 如果真空一直维持在  $10^{-5}$  torr 或更好的水平上, 再次放电, 各类波形出现的几率变化不大, 但是, 当真空破坏时, 器壁将丧失它的“记忆能力”。

环向磁场或工作气压的变化都明显地影响波形出现的几率, 环向磁场升高, 或工作气压升高, 都会使上述过程倒退, 即向号码数少的方向发展, 比如一轮实验中在环向磁场为 1.5kGs 下清洗放电 860 次之后, 改变环向场大小, 发现 C 放电波形变化结果如表 1。

真空室对 C 放电波形归类除了有上述的长期“记忆能力”之外, 同时还有短时间的“记

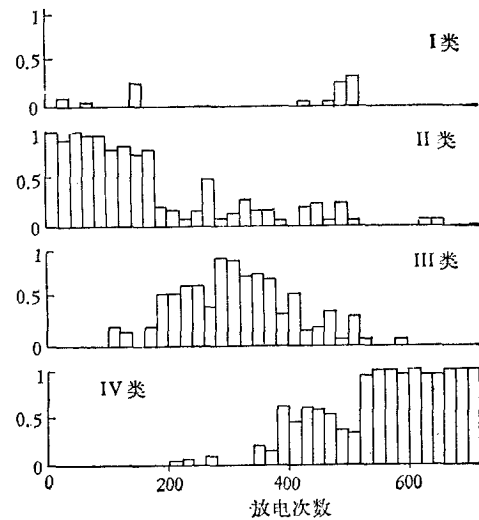


图 9

表 I C 放电波形随环向场的变化

环向磁场 (kGs)	1.1	1.5	2.0	2.5
C 放电波形	III	II	II	I

忆能力”,即一次放电属于那一类和前一次放电的归类有关. 如果将清洗放电看成一个随机的事件,则整个清洗放电的进行过程将是一个随机的过程,其相邻两事件的相关是由其概率转移矩阵来表示.

我们对延续 170 次条件完全相同的 C 放电波形进行统计处理. 得到其放电波形归类的一次(即相邻两次放电)及二次(即相隔一次之间)的概率转移矩阵如下:

$$P^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.02 & 0.37 & 0.04 & 0.57 \\ 0 & 0.75 & 0 & 0.25 \\ 0 & 0.94 & 0 & 0.06 \end{pmatrix},$$

$$P^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.01 & 0.7 & 0.02 & 0.27 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0.016 & 0.404 & 0.03 & 0.55 \end{pmatrix}.$$

如果每次放电仅影响后一次而不影响再后一次,那末  $P^{(1)}$  连续作用两次应与  $P^{(2)}$  一致. 实际上有

$$P^{(1)} \times P^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0.9375 & 0 & 0.0625 \\ 0.0074 & 0.7013 & 0.0148 & 0.2765 \\ 0.015 & 0.5119 & 0.03 & 0.4431 \\ 0.0186 & 0.4055 & 0.0375 & 0.5384 \end{pmatrix}.$$

将它与  $P^{(2)}$  比较,两者非常接近. 说明 C 放电作为随机过程是无后效的,或者说后效比较少,是一个马尔可夫过程. 说明装置对 C 放电波形的归类存有一种短暂的记忆能力,并且影响下一次放电,同时一次放电也将基本上破坏了前一次放电得到的记忆.

上述 C 放电波形归类的变化,可以认为是反映了等离子体内的密度效应. C 放电过程一方面器壁吸附粒子使密度下降,另一方面器壁被轰击放出粒子使密度上升. I 类放电是属于后一过程占优势,而 IV 类放电主要发生前一过程. 纵场的增加将抑制前一过程,因而有利于向号码少的放电类型过渡. 气压改变效果相类似. 不同类型放电给器壁留下的“痕迹”是不同的,因此 C 放电的短期及长期的“记忆能力”主要在于器壁.

### 三、横向磁场形态对放电的影响

在托卡马克装置中除环向磁场外,在子午面上的横向磁场对约束等离子体极为关键. 大环方向的平均垂直场是维持电流环整体平衡所必需的,而水平径向场总是损害这种平衡. 在 CT-6 装置中有关横向场(包括垂直场和水平场)对放电的影响主要有两个方面:

(1) 横向场对气体击穿的影响; (2) 横向场对等离子体柱平衡的影响。

1. 横向场对气体击穿的影响 众所周知, 托卡马克型装置利用等离子体本身的环电流产生的极向场达到迴转变换约束等离子体, 因此存在一个临界电流。当环电流低于该值时, 由于磁漂移及横向场作用, 粒子轨道是开放的, 不能形成正常的托卡马克放电。计算表明, 当横向场  $B_v$  接近环向磁场  $B_t$  的 0.1% 时, 粒子的损失主要是由于磁力线开放而造成。磁力线从器壁的一个地点出发在真空室内多次绕圈之后终止于器壁的另一地点。而沿着磁力线运动的电子的行为非常类似于在低气压电极间距离长的有极放电管中的行为。此时对应电极距离为

$$d = 2aB_t/B_v \quad (1)$$

而电极之间的电压

$$U_a = (2aB_t/B_v) \times E \quad (2)$$

式中  $B_t$  为环向磁场,  $B_v$  为横向磁场,  $a$  为隔板半径,  $E$  为涡旋电场。在有极放电管中, 当电压和电极距离乘积大于某临界值时, 在一个很宽的范围之内, 最低的击穿电压  $U_{a \min}$  几乎是一个常数, 那末从(2)式可知最低击穿电场  $E_{\min}$  将与  $B_v/B_t$  成正比。这个结论在 CT-6 装置中很好地观察到。图 10 给出 CT-6 中最低击穿电压与外加水平横向场的关系。曲线最低点对应  $B_v/B_t$  值为

-0.15%。这表明装置中存在一个固有水平杂散场, 数值为环向场的 0.15%。必须外加一水平场以补偿它。因此, 通过研究击穿电压可以估算装置固有杂散场的大小。

2. 横向场对等离子体环平衡的影响 横向场的大小及形态决定了等离子体环的位置、运动速度及位移的稳定性, 因此每一个装置都要有一套好的平衡场线圈。它产生的横向场一方面用来补偿装置固有的水平杂散场, 另一方面又应能产生跟踪  $I_p$  变化的程序垂直场, 并且它的形态因子  $n \left( = -\frac{R}{B_t} \frac{\partial B_t}{\partial R} \right)$  要处于零和 3/2 之间。

CT-6 装置有一个水平补偿场线圈, 它产生的水平补偿场的波形和环向场相同, 数值可调, 主要用来补偿水平杂散场。同时有垂直场线圈, 它是在气体击穿稍后时刻供电。电流上升时间约为 1ms, 加上铜壳的屏蔽效应, 垂直场的上升不可能与电流  $I_p$  上升完全同步, 但是两者是一起上升的。实验表明这样的平衡场系统能满足运行的基本要求。

垂直场的数值是可调的, 在正常的参数下, 平衡等离子体环的垂直场要大于 200Gs。事实上, 在 40—100Gs 之间变化并不影响在放电中间某一时刻得到等离子体最好的参数, 其原因已在第一节说明。因此在 CT-6 装置中等离子体柱是在不断地向外运动。为了使放电时间持续得更长, 我们在放电中期再加一脉冲垂直场, 将等离子体柱向内侧推一下。这时发现在较低环电流值下可将放电持续时间延长到 30ms (见图 11)。看来为了更长时间的稳定放电, 必需采用更完善的垂直场系统, 或者由位移信号控制的负反馈垂直场系

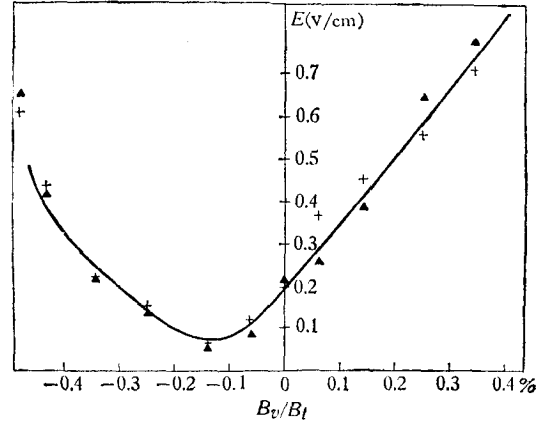


图 10

▲ 为  $B_t = 5\text{kGs}$ ; + 为  $B_t = 10\text{kGs}$

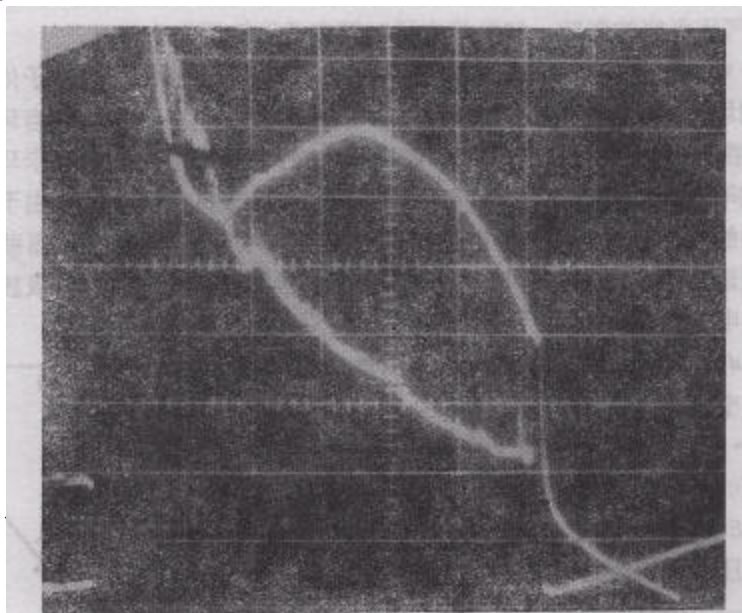


图 11

上线: 环电压每格 1V;  
 下线: 环电流每格 3.7kA;  
 时标: 每格 5ms

统。

为了研究磁场形态畸变对等离子体环平衡的影响,在 CT-6 装置上专门设置了产生各种磁场形态的线圈,其中有

1) 在装置外边放了一个电磁铁,它在等离子体柱约 20cm 范围内最大能产生 40Gs 的局部水平场。

2) 在装置外绕有交叉的场线圈,它能在大环方向产生一个模数为  $n = 1$  的不均匀水平场  $B_{\parallel} \cos \varphi$ , 其中  $\varphi$  为大环角,  $B_{\parallel}$  最大值可达 60Gs。

3) 绕有一个  $n = 1, l = 2$  的螺旋绕组,并在等离子体形成之后供电。

4) 绕有一个四极场绕组,线圈上的电流大小可改变绕组产生磁场的形态因子  $n$ ,  $n$  在  $-0.5$  和  $3.5$  之间变化。

所有的实验结果表明,只要将水平场在大环方向的平均值仔细地予以对消到零,则未发现等离子体柱的平衡有明显的改变。说明上述畸变的强度不足以使等离子体柱产生宏观不稳定性。在宏观不稳定性没有出现之前环向磁场是一个很强的平均化因素。它抹去大环方向不均匀带来的效应。而导体壳将抑制由于磁场形态因子  $n$  值过大或过小而引起的位移不稳定性。

#### 四、预 电 离

当环向磁场大于千高斯,充气气压大于  $7 \times 10^{-4}$  torr 时,放电的形成没有特殊困难,并不需要特殊预电离措施。如果横向杂散场能较好地抵消,最低击穿电场可降到 0.06—

0.08V/cm. 但是工作气压进一步变低时, 由于放电击穿时刻延迟, 使放电逐渐变得不稳定. 当工作气压下降到  $5 \times 10^{-5}$  torr 时, 气体不易击穿.

为了使工作气压在  $7 \times 10^{-4}$  torr 到  $1.5 \times 10^{-4}$  torr (我们经常使用的工作气压) 之间能够稳定, 在 CT-6 装置上加适当的预电离措施是必要的. 预电离的目的就是要在真空室内在放电前产生足够多的自由电子, 以减少气体击穿之前积累电子浓度所需要的时间, 保证放电稳定.

在 CT-6 上试用过的预电离方法有两种: 1) 电容器通过伸进真空室内针状钨电极放电; 2) 35GHz 的微波束.

钨针预电离的原理如图 12 所示. 电容器 C 充电到 10—15kV. 平时由于真空室内气压较低 ( $10^{-4}$  torr), 钨针到真空室器壁上任何一点直线距离都不够大, 不能引起放电. 可一旦建立环向场之后, 通过磁力线连接针与器壁之间的距离是足够的长, 使得放电成为可

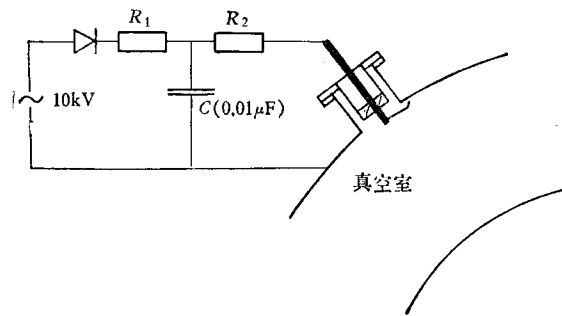


图 12

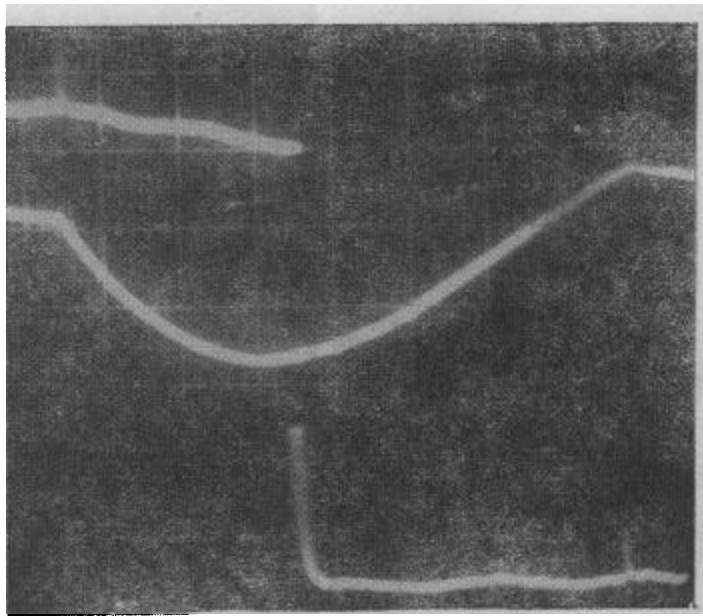


图 13 预电离电容器上电压变化

上线: 电压每格 2kV;  
下线: 环向磁场每格 3kGs;  
时标: 每格 10ms

能。但由于路程长,电极面积小,放电电流比较小,但是它产生的自由电子足以完成预电离的任务。涡旋场放电之后,等离子体建立,电容器上的电量很快放出(见图 13)。

微波预电离的微波源是中国科学院电子学研究所提供的 100W 35GHz 分布作用腔振荡器。微波束在赤道面上垂直于环向磁场方向通过云母窗射入真空室。微波的电场矢量振荡方向垂直于环向磁场。微波预电离的机理是电子回旋共振吸收。35GHz 对应于 12.5kGs 的电子回旋频率。环向磁场在赤道面上分布是不均匀的。它与大半径成反比。因此,当 CT-6 的中心环向场在 10.4 到 15.6kGs 范围之内变化,在真空室内都能找到满足共振吸收条件的空间点,使气体发生电离。环向磁场的上限由于装置条件限制未能得到,但实验证明,环向磁场低于 10.1kGs 就没有预电离的作用。

两种方法比较表明,微波有更强的电离效率。实验发现,只需要一瓦微波功率输入真空室,就能达到预电离的效果。它将可放电的气压下降到  $5 \times 10^{-6}$  torr, 而钨针放电只能达到  $5 \times 10^{-3}$  torr。但是钨针放电的技术要比微波预电离简单得多。因此我们最常用的预电离方法仍然采用钨针预电离。

实验没有发现我们采用的预电离方法对等离子体的参数有任何影响。说明上述两种预电离功率都比较小。预电离产生的带电粒子的浓度与能量都不足以影响等离子体形成之后的温度与密度。同时也表明钨针有极放电也没有轰击出过多的杂质而污染等离子体。

## 五、隔板实验

为了减少隔板材料污染等离子体,隔板材料应能同时具有高的热负荷能力、低质量

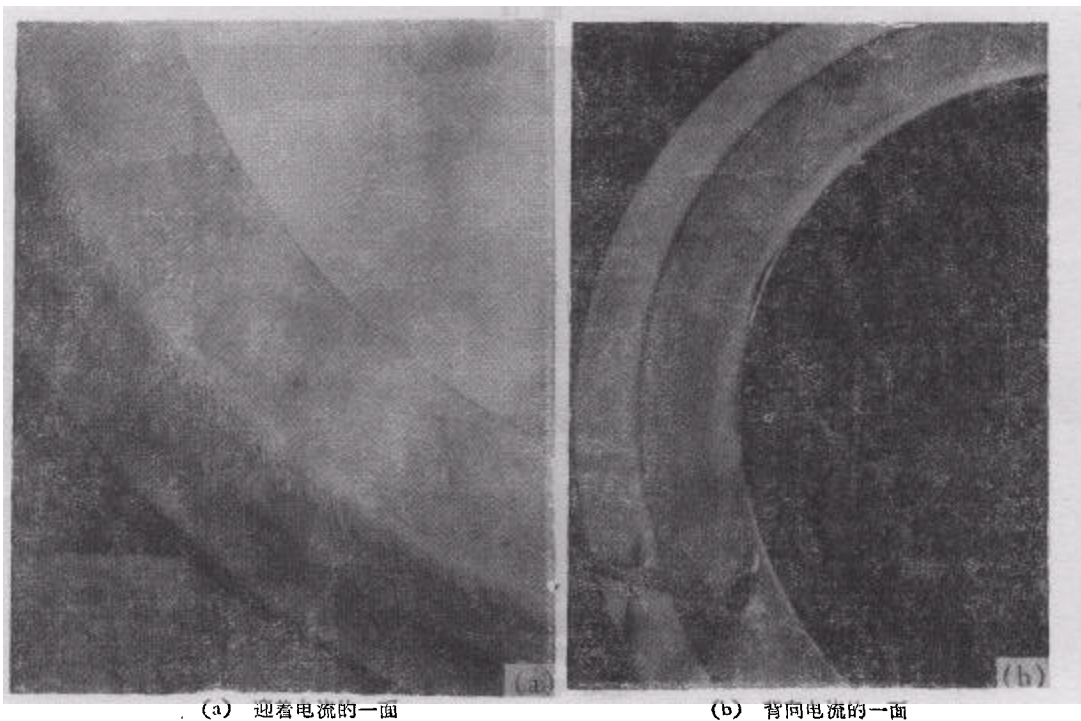


图 14

数、小的溅射系数等等。事实上, 这些要求不能同时兼得, 因此国际上对隔板材料的评价也就众说不一<sup>[4, 5]</sup>。

隔板在放电过程中受到等离子体的作用是非常厉害的。图 14 是在 CT-6 上使用过后的隔板照片。从照片上可以看出, 在背着电流的一面, 它受到电子轰击, 主要集中在等离子体柱和隔板接触的边缘。其热负荷很大, 并使隔板熔化。而迎着电流一面被轰成坎坎凹凹的阴影。边缘大小与真空室内径相同。而阴影边缘却排列有很整齐的弧迹。弧迹很可能是单极弧烧蚀的轨迹。而阴影本身显然是高能粒子轰击的结果。

为了研究不同材料的隔板对放电的影响, 在 CT-6 上专门设计制造了一个在不破坏真空的条件下可更换不同材料隔板的转动装置, 如图 15。六种不同材料的隔板装在一个正六边形的转盘上, 整个装置放在真空室的外侧。经过特殊传动机构, 从室外控制转盘, 就可以使不同材料的隔板对着等离子体。而等离子体柱内侧有一个不更换的钨隔板。转动隔板的材料中除一个作长期使用的钨隔板外, 其余五个材料分别为铝、不锈钢、铌、钨和钼。图 16 为这些材料使用之后的照片。可以看出不锈钢和钼 (特别是钼) 在放电中烧熔得非常厉害。其实利用它们放电的总数不超过 100 次。

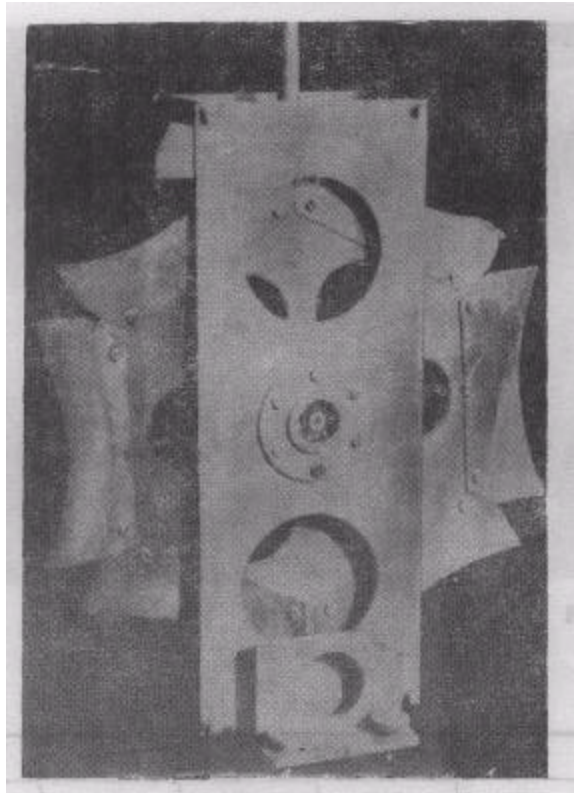


图 15 更换隔板材料的转动装置

测量了使用不同材料隔板时的等离子体的电导温度。所有实验条件完全相同, 结果如表 2。看来铝和不锈钢不是好的隔板材料, 而铌则比较好。

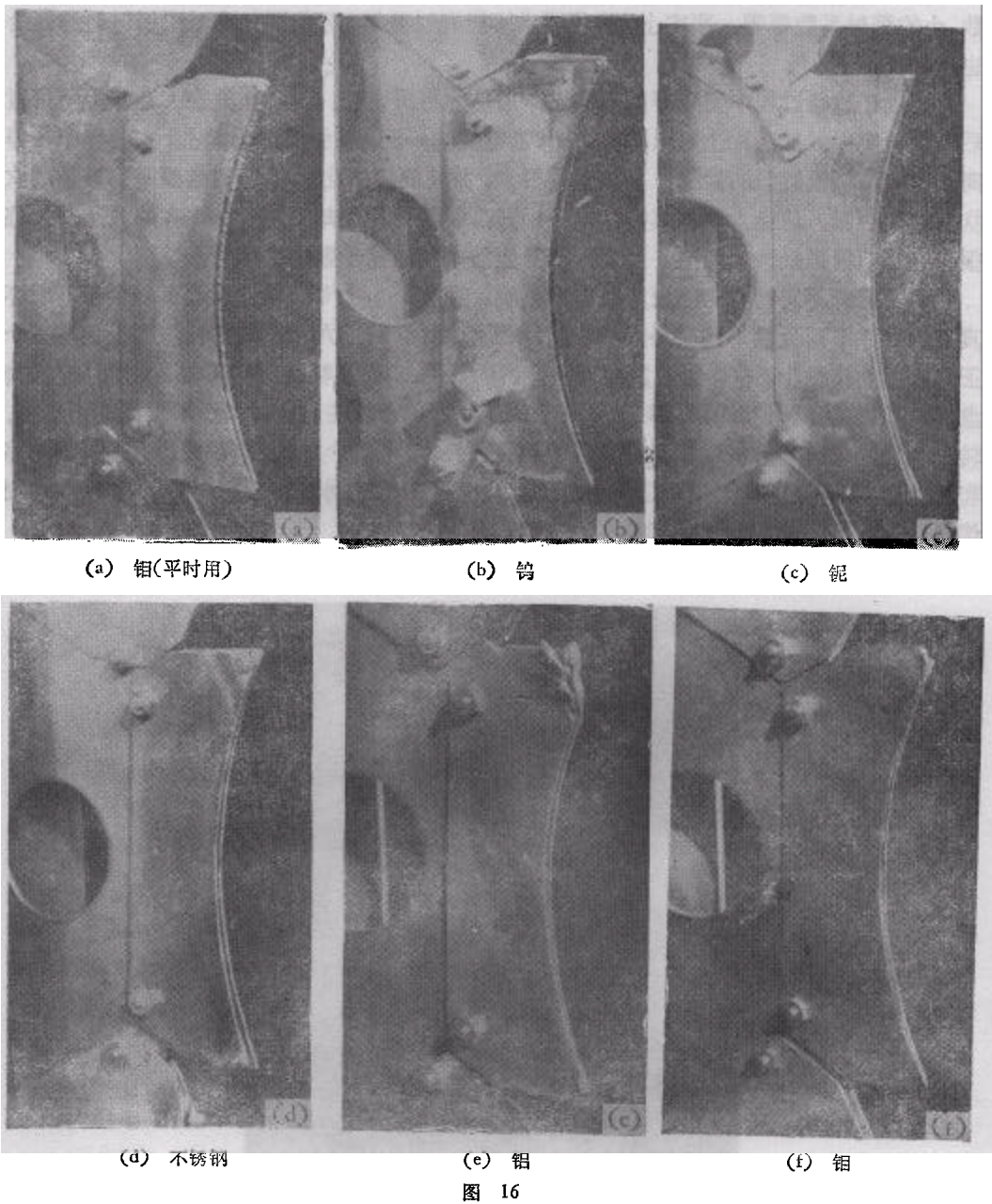


表 2 使用不同隔板材料时的电导温度

隔板材料	钼*	钨	铌	不锈钢	铝	钼
电导温度 (eV)	180	164	188	126	122	104

\* 此为长期使用的钼隔板。

更换隔板的实验还表明,隔板在放电中很容易清洗干净,多次的重复清洗放电的作用不在隔板而可能在器壁。当真空室被清洗放电到一定阶段之后,将几乎没有轰击过的隔

板转向等离子体。我们发现第二节提到的放电类型并不变化或者波形归类倒退,但只需经过少数几次放电之后就可回到原来的归类。看来大量的清洗放电主要是清洗真空室的器壁。但是要得到电子温度比较高的等离子体,必须对隔板进行必要次数的清洗放电,表 2 中最后一行钨隔板由于没有经过清洗放电,效果特别不好。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 中国科学院物理研究所一〇四组、中国科学院电工研究所四〇三组,物理学报 **29** (1980), 577.
- [ 2 ] H. P. Furth, *Nuclear Fusion*, **15**(1975), 487.
- [ 3 ] L. A. Artsimovich, *Nuclear Fusion*, **12**(1972), 215.
- [ 4 ] R. Bardet et al., *Nuclear Fusion*, **16**(1976), 579.
- [ 5 ] E. B. Meservey, *Nuclear Fusion*, **16**(1971), 593.
- [ 6 ] 王龙,科学通报, 25(1980).

## CT-6 TOKAMAK RESEARCH (II)

### EXPERIMENTAL RESULTS

GROUP 104, INSTITUTE OF PHYSICS, ACADEMIA SINICA

#### ABSTRACT

In this paper, the phenomena observed and characteristic relations deduced from large amount of experimental data accumulated during more than 40000 experimental discharges on CT-6 tokamak are described. They are related to the following aspects of tokamak plasma: conditions for stable tokamak discharge, stages of toroidal discharge formation, impurity behaviour and plasma-wall interactions, etc.