

等离子体中弹丸消融的 CCD 摄像*

郑银甲** 王瑞荣 冯震 肖正贵

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

【摘要】 描述了在 HL-1M 装置上氢弹丸注入时用高速 CCD 相机拍摄 $H\alpha$ 辐射照片的实验结果。得到了弹丸消融云图像、速度及轨迹。通过对照片的处理,获得辐射光强的空间分布。分析了弹丸轨迹发生弯曲及条纹现象,探讨了弹丸与等离子体相互作用的物理机制,为进一步在弹丸注入条件下用 CCD 测量等离子体局部磁场和电流分布打下了基础。

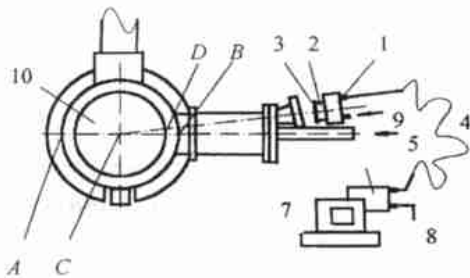
关键词 CCD 相机; 等离子体; 弹丸消融; 弹丸注入
中图分类号 O536; O539

HL-1M 装置是进行等离子体约束、平衡、加热理论及实验研究的中型磁约束托卡马克装置。弹丸注入是为未来稳态聚变堆加料方法而提出的,它可以控制放电等离子体密度分布,改善约束性能和提高密度极限。弹丸与等离子体的相互作用是一个十分复杂的物理过程。目前,一些诊断方法大都不成熟,用高速 CCD 摄像可得到弹丸注入消融过程的细节,这给人们进一步了解等离子体物理和弹丸消融机制提供了一条有效途径。

弹丸消融理论的基础是 Parks. P. B 提出的中性屏蔽模型,即固体弹丸表面受到形成的中性气体云的保护而不受等离子体中电子的轰击。弹丸消融经历三个阶段:第一阶段形成高密度中性云层,其次中性气体在极短的时间内被电离生成低温($\sim 2\text{ eV}$)高密($\sim 10^{23}\text{ m}^{-3}$)的等离子体。在上述两个阶段,由于电子回旋频率 ν_{ce} 远小于电子-离子碰撞频率 ν_{ei} ,云层不被磁场约束而向径向扩散。当 ν_{ce} 增大到比 ν_{ei} 大时,弹丸消融进入第三阶段,径向扩散被禁止,整个弹丸云趋于磁力线方向扩散。

1 实验布置

弹丸沿水平方向垂直注入等离子体,为了拍摄到弹丸进入等离子体的全过程,我们设计了弹丸观测窗口和相机座架,该座架可进行适当调节。相机安放于弹丸的发射管轴上方 8.7 cm 处,光轴与注入方向夹角为 8.3° ,并且在同一极向平面内。拍摄玻璃窗口直径 $\phi 60\text{ cm}$ 。相机前装有 $\phi 50\text{ cm}$ 变焦镜头,以及 $H\alpha$ 线的干涉滤光片,滤光片中心波长 $\lambda = 656.3\text{ nm}$,半宽度 $\Delta\lambda = 7.0\text{ nm}$,整个实验布置如图 1 所示。



1 为 CCD 相机 2 为变焦镜头 3 为干涉滤光片 4 为 40 m 光纤
5 为弹丸注入方向 6 为 PCI 接口板 7 为微机 8 为弹丸触发信号
9 为电源供电 10 为等离子体



AA 为水平焊缝 BB 为扁口法栏中心线
CC 为等离子体中心线 DD 为等离子体边缘线

图 1 实验布置图

图 2 弹丸注入方向背境图

1999 年 4 月 14 日收稿

* 国际原子能机构技术援助项目,项目号: CPR/41013

** 男 54 岁 硕士 副研究员

由图 1 不难看出, 由于夹角太小, 确定弹丸在等离子体中精确的消融径向位置比较困难^[1]。由于在背景照片图 2 上我们能拍摄出真空室远端内侧水平焊缝 AA (它恰好就是与赤道平面的交线) 以及保护板固定螺孔 (垂直方向两个螺孔孔距为 111 mm), 真空室近端与赤道平面的交线 BB 由跑道型窗口的水平中心线确定。根据线 AA 、 BB 可确定等离子体中心线 CC 及边缘线 DD (AA 、 BB 、 CC 、 DD 相应于图 1 中的 A 、 B 、 C 、 D 点), 照片上的弹丸云尺寸可根据固定螺孔的图上距离与实际距离的比例关系来近似确定。

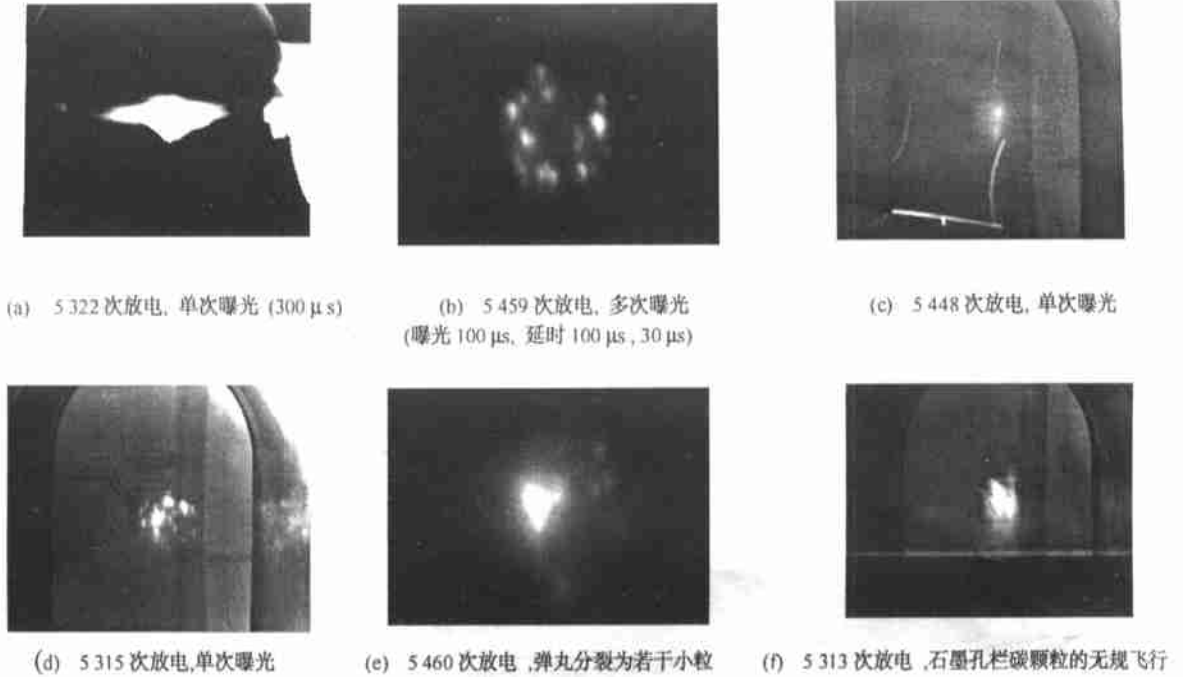


图 3 弹丸消融图

3 实验结果及数据分析

我们在 1998 年度 HL-1M 物理实验中采用 CCD 相机首次在我国拍摄到弹丸消融照片。HL-1M 装置大半径 1.02 m, 由石墨孔栏限制的小半径为 0.26 m。弹丸注入实验时, 等离子体平顶电流 $I_p = 120 \sim 160$ kA, 装置纵向磁场 2.2 ~ 2.4 T, 线平均电子密度: $n_e = 0.3 \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 电子温度: $T_e = 500 \sim 800$ eV。图 3 是拍摄的典型照片, 这些照片参照其他诊断信号可得到一些有意义的结果。

弹丸消融云中的中性氢原子发出 $H\alpha$ (656.3 nm) 线, 在图 3 a 中消融云跟随局部磁场被拉长是一个十分有趣的现象。如果粒子在离化和复合态之间快速改变, 即单个粒子能较长时间停留在电离态而受磁场影响, 然后在再次电离前复合发出光辐射, 那么中性粒子的轨迹近似接近于磁力线, 而且只有云的周边离子会跟随磁场, 这预示着一一种测量倾斜角 $\theta = \arctg(B_\theta / B_T)$ 的方法。

图 3e 可以看到许多碎块, 在弹丸注入方向的上下左右方散开, 这说明弹丸分裂成碎块, 这些碎块是在弹丸枪或在枪管中穿行时产生的, 颗粒都比较小, 时间间隙在 100 ~ 300 μ s 之间, 在形成消融云后在等离子体中很快消失了。在处理这张照片时, 我们发现光强呈条纹分布, 见图 4a。这些条纹呈等距的亮暗相同的带条, 是弹丸云消融起伏的表现。弹丸照片中的条纹是普遍存在的, 它的成因有几种说法, 一种认为弹丸穿越磁面的能流降落而减小了消融率; 有的把条纹的出现与消融云的电离相联系, 因为电离形成了附加的冷等离子体屏蔽层; 还有一种把条纹说成是弹丸径向运动期间消融率的简单破裂^[2]。条纹的出现和机理有待进一步的研究。

图 3f 上有一些紊乱的亮线, 这些亮线在弹丸未注入的情况下也拍到了, 这可能是放电期间从石墨孔栏上打出的碳粒子的无规行走, 因为碳原子发出的 CII 线波长为 6 578.05 nm, 处在干涉滤光片带宽内。这提供了一种观测和诊断孔栏溅射的可能性。

图 4a 显示了多次曝光照片图 3 b 的光强空间分布, 由图中可看到: 在等离子体边界附近并没有出现消融云, 可能是边界的 n_e 和 T_e 很小, 云的辐射线十分微弱。在小半径大于安全因子 $q(r)=2$ 的区域消融云是园形对称的, 如光强分布图中第一个峰, 当跨越 $q(r)=2$ 面进入等离子体更深层弹丸轨迹的时间积分在沿着纵向磁场方向被拉长了, 第二、三个峰由于延迟时间缩短, 使峰间间隔亦缩短。

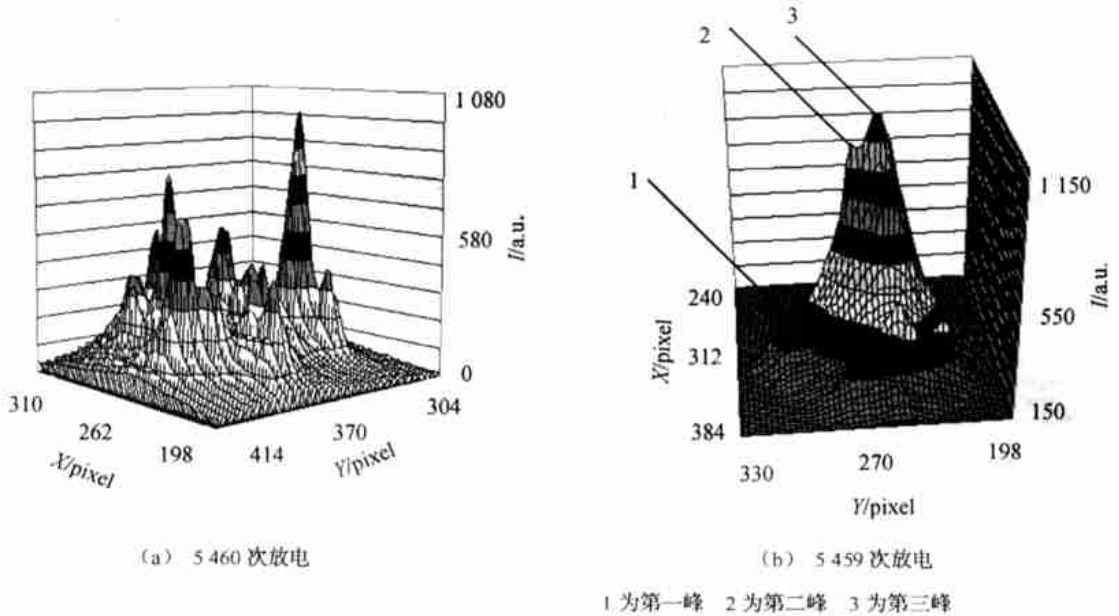


图 4 多次曝光消融云的光强度分布

弹丸枪口距等离子体边界距离为 5.1 m, 根据第一峰出现的延迟时间可以估算出弹丸飞行速度 v_p , 见表 1(序号 1); 也可以采用垂直于弹丸注入方向上的窗口测得的 H_α 信号来估算弹丸飞行速度, 见表 1(序号 2)。

表 1 弹丸速度的估计

序号	放电序号	总延迟时间/ms	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	5 459	4.93	1 030
2	5 322	4.75	1 080

在图 5a 以及图 3c 中, 消融云的轨迹明显偏离弹丸注入方向且向等离子体电流 I_p 相反的环向方向弯曲。这种现象最有可能的解释是由于超热电子驱动的火箭效应^[2]。为了肯定这种解释, 参照硬 X 射线的测量, 在第 5 322 和 5 448 两次放电实验中证实了超热电子的存在。

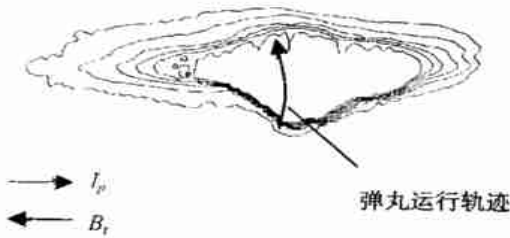
由实验测得的光强等值线图 5 b 可得出环向和径向方向上的发射截面图 5 c。图上存在着明显的非对称性, 消融云的电子流侧和离子流侧强度有不同的环向衰减长度, 处于电子侧梯度更陡^[3]。在类似的 TEXT 和 TFR 实验中也观测到弹丸云在 2 cm 内 ($T_e \approx 5\text{eV}$, $n_e \approx 1 \sim 2 \times 10^{23}\text{m}^{-3}$), 电子侧: T_e 快速上升, n_e 快速下降。

由于热电子的碰撞时间比电子从放电的感应电场增益足够能量的时间短得多, 热电子的速度分布几乎是各向同性的。相比超热电子有更长的自由程, 它们可能从电场获得足够能量来加强电子侧的速度分布, 这种由超热电子引起的非各向同性的电子流便引起了更快的消融过程而使弹丸轨迹发生弯曲。

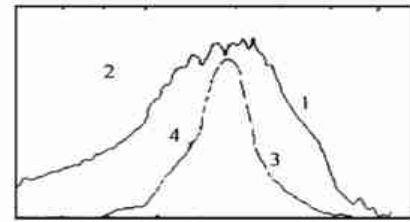
消融云在极向方向上也存在非对称性, 这种非对称性表明弹丸注入时, 可能出现等离子体沿极向反时针方向旋转。该旋转方向与文献[4]在 HL-1M 托卡马克上用马赫探针测量的结果相符。



(a) 5 322 次放电消融云



(b) 5 322 次放电光强等值线



(c) 环向和极向方向的光强分布
1 为电子侧 2 为离子侧 3 为反新经典侧 4 为新经典侧
环向方向 (实线) 极向方向 (虚线)

图 5 5 322 次放电消融云图

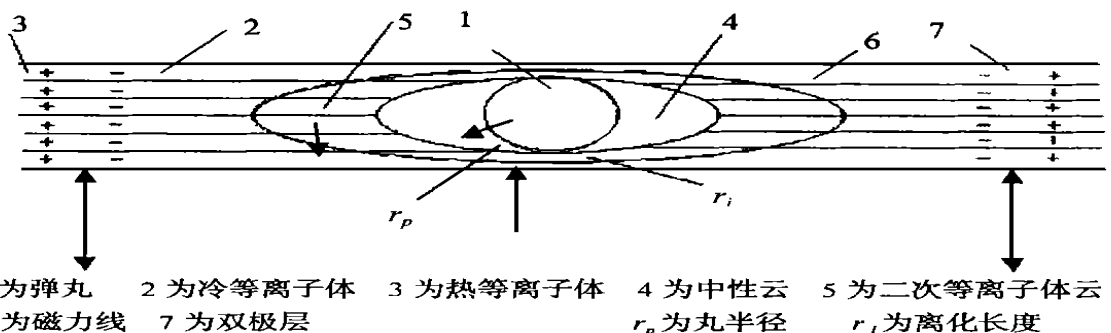
4 讨论与结论

1) 考虑了电子和离子的能量分布的 B. V. Kuteev^[5] 二维消融模型认为: 主要的消融热流由热电子支配, 电子在弹丸表面沿磁力线运动, 穿越热、冷等离子体双极层的交界面或进入离化半径的鞘层附近, 在通过二次等离子体云和中性云层时被减速, 如图 6 所示。消融率由为^[5]

$$\frac{dN}{dt} = 3.46 \times 10^{14} n_e^{0.453} T_e^{1.72} r_p^{1.443} M_i^{-0.283}$$

式中 n_e (cm^{-3}) 为电子密度, T_e (eV) 为电子温度, r_p (cm) 为弹丸半径, M_i (原子单位) 为弹丸质量。消融过程中伴随着 H_α 光发射, 在电子温度超过原子或离子的电离势 $e\phi_i$ 时, 发光强度 I 正比于 dN/dt , 其比例系数 (激发速率和电离速率 $\langle \sigma v \rangle_{exi} / \langle \sigma v \rangle_{exi}$) 近似是常数。因此弹丸的轨迹及消融云的膨胀形状通常用照相的方法来研究

2) 弹丸的消融照片和数据来自 CCD 相机的积分信号, 理论上说在 $\sim r_p / v_p$ 的尺度上研究弹丸的消融、条纹的形成、弹丸与等离子体的相互作用可获得比较满意的结果, 但要求 CCD 相机具有较高时间分辨率。为此将曝光时间缩短到几至几十微秒, 以及改善弹丸注入与相机触发信号的同步是必要的; 并可以利用弹丸云及其轨迹的照片来确定漂移运动、磁场和快电子。



1 为弹丸 2 为冷等离子体 3 为热等离子体 4 为中性云 5 为二次等离子体云
6 为磁力线 7 为双极层
 r_p 为丸半径 r_i 为离化长度

图 6 Kuteev 模型

3) 实验中取得了多种清晰的弹丸消融照片,从照片中得到了十分有价值的弹丸飞行速度和消融轨迹、条纹等。由此可见,CCD 摄像作为一种等离子体诊断方法今后将发挥重要作用,也必将对弹丸消融过程提供更丰富的照片和信息。

参 考 文 献

- 1 TFR Group. Pellet injection experiment on the TFR tokamak. *Nucl Fusion*, 1987, 27(12): 1 975~1 999
- 2 Chang C T. Pellet-plasma interactions in tokamaks. New York: North-Holland, 1991, 206(4): 143~196
- 3 Egorov S M, Galkin V A, Kaprolov V G. Pellet ablation study in F10 using photographic technique. IAEA-CN-531, 1990, 2(5): 599~609
- 4 洪文玉,王恩耀,潘宇东,等. HL-1M 装置边缘扰动和流速的实验研究. *真空科学技术*, 1998, 18(3): 176~186
- 5 Kuteev B V. Hydrogen pellet ablation and acceleration by current in high temperature plasmas. *Nucl Fusion*, 1995, 35 (4): 431~453

CCD Photography of Pellet Ablation in Plasma

Zheng Yingjia Wang Ruirong Feng Zheng Xiao Zhenggui

(Southwestern Institute of Physics Chengdu 610041)

Abstract The experiment result of $H\alpha$ radiated photos taken by CCD camera is described in HL-1M device. The photo of various ablation cloud, pellet speed and trajectory are obtained. Through the photo treatment, the space distribution of the radiation is given. The track bending and the appearance of striation are analyzed, inquiring into the physical mechanism of pellet-plasma interactions. Therefore this paper lays the foundation of further measurement for local magnetic field and current profile of plasma with CCD camera under the condition of pellet injection

Key words charge coupled devices; plasma; pellet ablation; pellet injection

·科研成果介绍·

红外语音接收电路

主研人员 唐 广 曾 洁 焦方华 王松梅 王兆明

红外无线耳机是以红外光作为载体传递语音信号的系统,它由发射与接收两部分组成。由于红外无线耳机不需要连接导线,使用者可以在发射器的有效覆盖范围内自由活动,它没有电波干扰,音质好,空间隔离好。

UE706 红外语音接收电路包含红外语音传输系统,接收部分全部功能的单片集成电路。采用移频解调技术有效展宽了副载波工作频段;采用高增益限幅放大电路,提高了电路抗干扰能力;增加了静噪功能;采用片内稳压与对电压的不敏感设计,保证低电压下正常工作;采用微电流设计,实现低功耗要求。产品外围设计简单,调试方便,适合批量生产。

本成果研究开发的成功为我国全定制集成电路开发提供了经验,也对改变国内集成电路行业基本仿制国外产品的情况做出了一些贡献。

·科 卜·