

139-143

第5卷第3期
1999年9月真空与低温
Vacuum & Cryogenics

139

HT-6M 和 HT-7 托卡马克的多发靶丸注入试验研究

杨 愚, 鲍 抑, 辜学茂, 何也熙

(中国科学院等离子体所托卡马克研究室, 合肥 230031)

(收稿日期 1999-03-23)

TL631.24
TL629.1

MULTI-PELLET INJECTION RESEARCH ON HT-6M AND HT-7 TOKAMAKS

Yang Yu, Bao Yi, Gu Xuemao, He Yexi

(Tokamak Division, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: One set of multi-shot in-situ pellet injection system, with the maximum capacity of 8 pellets during one discharge, has been constructed in the Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences. It has been operated on HT-7 tokamak, the 1st superconductive tokamak in China, and HT-6M for the single and multi-shot pellet injection experiments. Its differential section and control unit are proved to be convenient and reliable. The velocity and dimension of the pellets are measured. During the experiments, significant and typical phenomena are observed. Deep fueling is obtained. The line average electron density in the center is increased by one half in the single pellet injection, and for 100% in the 2-pellet injection. The hollow electron temperature profile is also observed. In this paper, the structure and the operation of the multi-shot pellet injection system are introduced. Some experimental results are provided and the simple physical analysis are given.

Key words: tokamak, fueling, pellet injection, vacuum, cryogenics

摘 要: 最大发射能力为 8 发的多发“原位”靶丸注入装置已在中科院等离子体所建成。在 HT-7、中国第一座超导托卡马克和 HT-6M 上进行了单发及多发试验。其差分单元及控制单元稳定可靠, 试验中测量了靶丸的尺寸和速度, 观察到显著而典型的物理现象, 实现了深度加料。加料效果显著, 在单发靶丸注入时中心弦平均密度增长约 50%, 双发注入时约 100%。实验中也观察到了明显的电子温度中空分布。文章介绍了系统的结构及操作, 给出了实验现象及初步的物理分析结果。

关键词: 托卡马克 加料 靶丸注入 真空 低温

中图分类号: TL631.2-4 TB61-93 TL62-9.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-

7086(1999)03-0139-05

弹丸注入是目前受控核聚变研究的一项重要手段, 要求工作在真空、低温下, 技术上涉及精密机械、气动力学、自动控制等诸多领域, 十分复杂。自从在 Puffatron 上进行试验至今^[1], 应用冷冻的氢及其同位素对聚变研究装置进行添加燃料的工作已经开展了 20 多年。相比于充气加料, 靶丸注入有如下优势: (1) 可实现深度加料; (2) 加料效率高; (3) 再循环少; 而且在将来含氙的运行中, 对氙的量可以进行更好的统计^[2]。

在目前的受控热核聚变研究中, 靶丸注入是深度加料到磁约束等离子体的主要技术, 它也

被认为是将来稳态运行的聚变反应堆上最可能应用的加料手段。同时,在许多装置上都观察到了在靶丸注入时,粒子约束和能量约束均得到了改善。此外,通过研究等离子体与靶丸相互作用,探求等离子体输运等特性也是近年来发展很快的诊断方法。

靶丸注入的应用可分为等离子体控制与等离子体诊断两方面。用杂质注入器向等离子体中注入 Li、C 等杂质,可测量 $j(r)$, $\theta(r)$, 研究输运;有的装置上通过注入 Li 丸进行壁处理。还有一类特别的注入器是用于在紧急情况下注入靶丸,熄灭等离子体,以免不稳定性发展到大破裂而损伤装置。

常见的加料用注入器按成冰方式可分为直接冷冻式和活塞挤压式;按加速方式可分为气动力和离心加速。这些设计各有千秋。直接冷冻成冰和气动力枪加速的结构简单,而挤压式成冰对丸尺寸控制得好,离心加速则可实现长期连续发射。本靶丸注入器采用的是直接冷冻成冰、气动力加速模式,它结构相对简单,运行维护相对方便。装置可在 15 h 内到达成冰状态,液氮消耗小于 5 L/h。一次放电中可提供 8 发靶丸。

HT-6M 是个小型托卡马克 ($R=0.65$ m, $a=0.2$ m), n_e 约 1×10^{13} cm⁻³, T_e 约 500 eV。HT-7 是超导的中型托卡马克 ($R=1.22$ m, $a=0.28$ m), n_e 与 HT-6M 相近, T_e 约 1 000 eV。迄今为止,在 HT-6M 和 HT-7 超导托卡马克上多次进行了欧姆放电和辅助加热放电条件下的靶丸注入实验,观察到丰富的现象。

1 注入系统

多发靶丸注入系统由以下 4 部分组成:注入器、降温回路、差分单元和靶丸诊断单元。降温回路始于液氮杜瓦,经注入器成冰部的恒温块,联到氦气回收管路。成冰部降到成冰温度后,导入原料气体即可形成靶丸,由高压驱动气弹射飞出,经差分单元减压去除驱动气后,靶丸飞入托卡马克。诊断单元可测出靶丸的飞行速度,拍摄飞行中靶丸的尺寸。

注入器的成冰部结构如下:8 个相互平行但内径不一的管道穿过恒温块的圆孔,这些圆孔均匀分布在一个圆周上。管道和恒温块间用钢填充间隙,有很高的热导率,这样就在管道上形成对称的温度梯度,穿过孔的部位温度最低,两边逐渐升高。这个温度梯度可通过对管道两端加热来调节^[1]。靶丸的形成步骤见图 1。靶丸的尺寸由管道的直径及温度梯度决定,速度可通过改变驱动压力进行调节。速度在一定程度上也受靶丸尺寸影响。

多发靶丸系统采用的驱动气压在 3 MPa 以上,若控制不善致使驱动气体进入托卡马克,必然会影响放电,甚至熄灭等离子体。所以差分单元十分重要。多发靶丸系统的差分单元结构如图 2 所示,由扩散室、管路和快阀组成。扩散室可使高压驱动气膨胀减压,加长管路可降低流导、延长气体传输时间。快阀在靶丸通过后迅速截断管路、缩短管路贯通的时间。在单发和多发靶丸注入实验中,差分单元均工作稳定可靠,未观察到驱动气体对离子体放电的影响。

此外,差分单元的管路也有利于保持靶丸飞行方向的准直,经台面试验测量,离散角控制在 5 (°) 以内。

原位成冰的靶丸注入器虽然结构相对简单,但成冰工艺难以控制,成冰的温度、压力、时间均影响着靶丸尺寸。知道靶丸的实际尺寸对寻求合适的成冰工艺是十分必要的。此外,靶丸的飞行速度也是十分重要的参数。所以,诊断单元是不可缺的。其原理图见图 3。

发射用的快阀在收到发射信号时迅速打开,将靶丸喷出,靶丸穿过垂直于弹道的光栅产生脉冲信号。从两个已知间距的光栅的脉冲间隔即可算出靶丸的飞行速度。光栅信号延时触发闪光灯,高速闪光将靶丸成像。多发靶丸系统发射的靶丸速度约 1 km/s,闪光时间约 10^{-7} s。

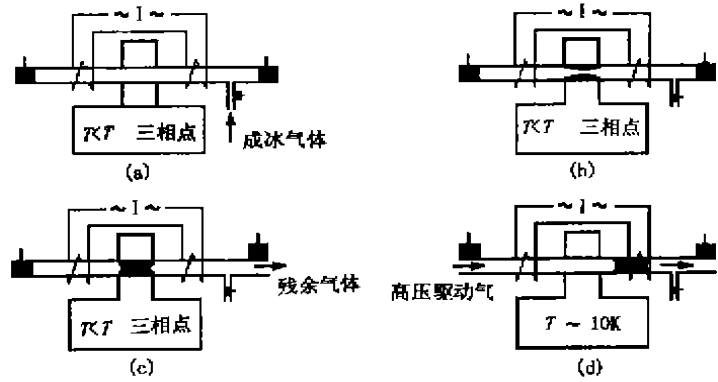


图1 原位成冰的原理

2 控制与操作

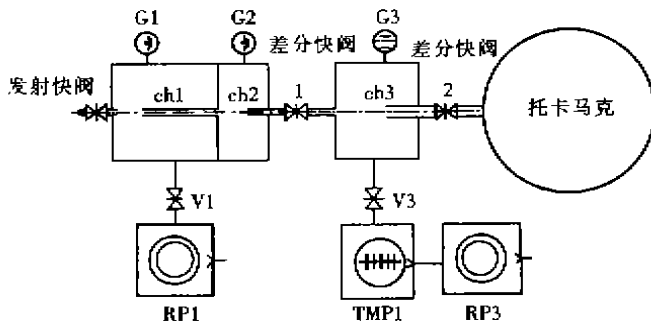


图2 多发靶丸注入系统的差分单元示意图

PC上的远控程序进行预设,放电时控制托卡马克放电的 VAX 机提供触发脉冲,PC 按预设向对应阀门发出信号。先同时打开差分单元的 2 个快阀,导通发射通道,在设定的时间开闭选定管道对应的发射快阀,差分单元的快阀在设定的滞后时间后关闭,截断发射通道。

在现场的控制柜上可以对靶丸注入系统的恒温块温度、加热丝电流进行调节,也可以对各个阀门进行操作。1 台个人计算机(PC)负责远控,控制程序运行于 Windows 操作系统。发射管的选择,差分单元的快阀开关时间和靶丸发射时间的预设,均可用鼠标选定。

发射靶丸的过程如下:放电前启动

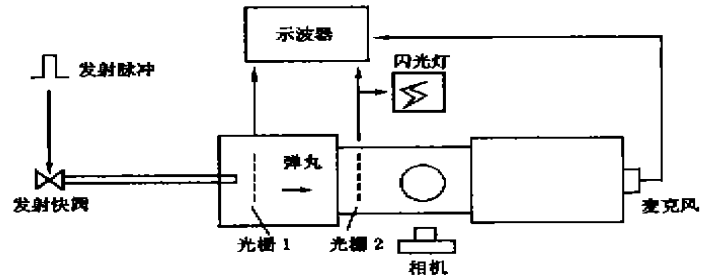


图3 多发靶丸注入系统的诊断单元示意图

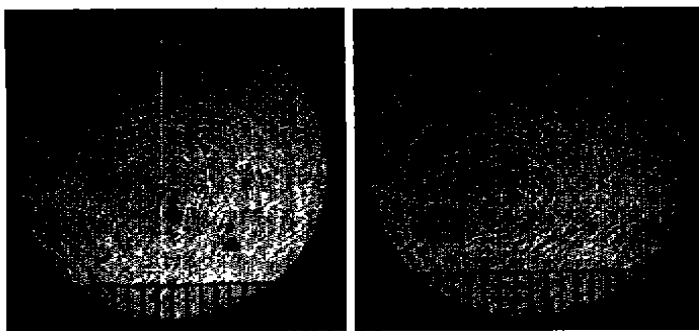


图4 用于 HT-6M 和 HT-7 装置的靶丸飞行中的照片 (视场下放置的标尺格间距 1 mm)

发射用的快阀开闭时间在 2 ms 以内。差分单元的快阀的开启时间因机械延时,设在靶丸发射前几十毫秒;其关闭时间则因考虑到靶丸和成冰管和粘滞作用及飞行时间,设于靶丸发射后 10 ms。

靶丸的穿透深度愈接近磁轴,加料效果愈好。多发靶丸注入系统产生的靶丸速度一般稳定在 1 km/s 左右,尺寸小了燃料粒子沉积深度浅,效果

不好;尺寸过大则会导致等离子体不稳定性及至破裂。所以靶丸尺寸控制十分重要。

根据与实验符合得比较好的描述靶丸消融的 Parks 中性气体屏蔽模型^[4]

$$\tau_p = 3.523 \times 10^{-7} n_s n_e(0)^{-1.3} T_e(0)^{-1.64} r_{p0}^{5/3} m^{1/3}$$

代入 HT-6 和 HT-7 托卡马克的运行参数,可得速度为 1 km/s 的靶丸,欲实现中心加料的其尺寸要求分别为 $\Phi 0.6 \times 0.8$ 和 $\Phi 1.0 \times 2.0$ 。实验中拍摄到飞行的靶丸照片如图 4。

3 实验结果^[5]

在欧姆放电下进行的靶丸注入观察到了典型的实验现象。单发靶丸注入后电子温度与离子温度均突然下降,由此导致等离子体电阻增加而引起电流的下降和环电压的上升。电子密度瞬间明显上涨,约 50 ms 后才逐渐回落到注入前的水平(见图 5)。有效 Z 在注入时猛降,再逐渐上升,变化过程和密度对应说明在注入引起密度变化的过程中,杂质含量下降(见图 6)。双发靶丸注入实验观察到近似的物理现象,而密度实现了台阶式上升(见图 7)。这使得利用多发靶丸注入不断提高密度,达到甚至超过 Greenwald 极限成为可能。

靶丸注入后观察到了密度的峰化,这反映出粒子约束变好。若靶丸未达磁轴即消融殆尽,密度分布先

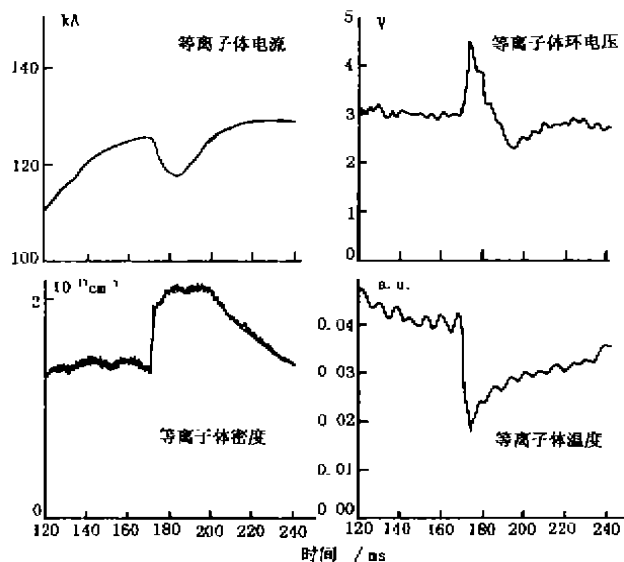


图 5 单发靶丸注入等离子体(170 ms 处)



图 6 靶丸注入时 Z_{eff} 变化(170 ms 处)

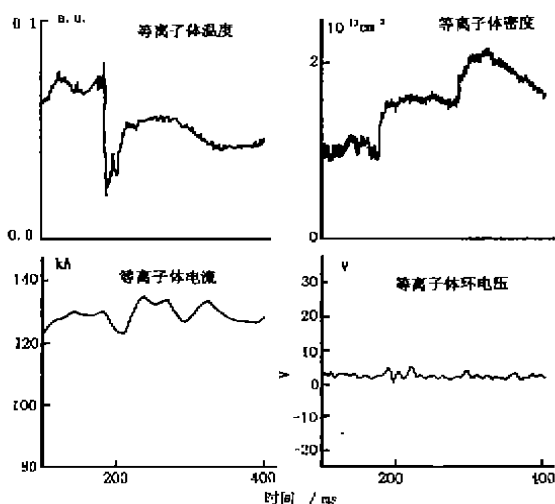


图 7 双发靶丸注入等离子体(180 ms 和 280 ms 处)

平化再迅速峰化约 30 ms。密度的有效半宽下降,这种现象常伴随着离子热扩散率的下降,能量约束可得到改善。靶丸注入后,中心电子温度约下降一半,并观察到中空的温度分布持续约 60 ms。

在 HT-7 托卡马克上也进行了 LHCD 和 ICRH 辅助加热放电中的靶丸注入试验。试验中观察到辅助加热可承受更大的靶丸,因而密度增量更大。原因可能是辅助加热条件下高能电子成分比欧姆放电多,加剧了靶丸的消融造成。

4 结 语

多发靶丸注入器系统经受了实际检验,反映各单元设计合理、操作方便可靠,是 HT-6M 和 HT-7 托卡马克上 1 项有效的加热手段。欧姆放电条件下的靶丸注入实验已经展开,并将逐步深入;辅助加热条件下的靶丸注入实验研究也将逐渐开展起来。

致 谢:作者对 HT-6M 和 HT-7 托卡马克的运行人员深表谢意,是他们提供了良好的实验条件;同时也十分感谢各诊断负责人提供了相关数据。在与李建刚、万宝年、李成富、高翔的讨论中,作者受益匪浅,在此一并致以谢意。

参 考 文 献

- [1] JΦrgensen L W. Plasma Physics, 17, 453(1975)
- [2] Chang C T. Review section of physics letter, 206, No. 4(1991)
- [3] Viniar I. Single and multi-shot in-situ pellet injectors at STU, Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Pellet Injection. Naka, Ibarake-ken, Japan(1993)
- [4] Parks P B. Magnetic field distortion near an ablationg hydrogen pellet. Nucl. Fusion 20(2), 311(1980)
- [5] Yang Y, Bao Y. Pellet injection experiments on tokamaks in ASIPP, 17th IAEA, Yokohama(1998)

第一作者简介:杨愚,男,1973 年生。1993 年毕业于合肥工业大学真空技术与设备专业。1999 年在中科院等离子体物理研究所获博士学位。主要从事真空系统的设计,托卡马克装置的真空运行与加料研究。(含系统残余气体质谱监测与装置壁处理)。

第四届全国低温工程大会在上海召开

由中国制冷学会和上海制冷学会主办,上海交通大学和中科院上海技术物理研究所承办的“第四届全国低温工程大会”已于 1999 年 7 月 25~28 日在上海交大常举行。来自国内 31 个单位的 93 位代表赴会,我国低温工程学科开创人洪朝生院士特邀赴会并作了我国低温工程发展与展望的报告,给与会代表极大的鞭策与鼓舞。

这次会议是继 92 年在兰州召开的第三届全国低温大会后的一次全国性低温工程大会,检阅交流了 7 年来我国低温工程科研与开发成果、商议了 21 世纪低温工程发展。会议共有 76 篇论文进行了交流,其中大会报告 6 篇,并出版了会议论文集(以低温工程 99 年第 4 期专辑型式出版)。代表们一致认为,我国低温工程研究近年来取得了很大发展,特别是在低温制冷机、低温生物和超流氦制冷方面取得了国际公认的成果。相继 5 位青年低温科研工作者在国际会议上获奖,更看出我国低温科学与技术的发展后继有人。鉴于低温科学与技术的研究和加快科学技术成果转化是我国低温科技工作者的神圣重任,也是使我国在国际科技激烈竞争中立于不败之地的重要措施,呼吁国家有关部门重视这一科学与技术的发展。

会议期间,还召开了专业委员会会议,决定今后每两年召开一次大会,并汇报交流了 2000 年 9 月左右在兰州召开的小型制冷机国际会议筹备情况和 2000 年 2 月在印度召开的 ICEC18/ICMC 国际会议的有关情况,并希望各单位给与支持。

(徐烈)