



HT-7 托卡马克氘丸注入实验研究

夏承遗 杨 愚 高 翔 辜学茂 程永飞
(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

Experimental Study of Deuterium Pellet Injection on HT-7 Tokamak

Xia Chengyi, Yang Yu, Gao Xiang, Gu Xuemao, Cheng Yongfei
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei, 230031)

Abstract The pellet injection system used in the HT-7 super-conducting Tokamak was briefly described. Deuterium (D_2) pellet formation technology, the D_2 pellet injection technique and the influence of the injection on the deuterium plasma were discussed. Changes in the distribution of the plasma density and temperature were also studied.

Keywords Pellet injection system, D_2 pellet formation technique, D_2 pellet injection experiment, Changes in the profile of plasma

摘要 简要介绍了用于国家中型超导托卡马克装置 HT-7 弹丸注入系统;详细阐述了在 HT-7 装置首次用于加料实验的氘(D_2)丸的成冰工艺、氘丸注入实验以及氘丸注入对等离子体产生的影响;研究了等离子体的密度、温度的分布变化。

关键词 弹丸注入系统 氘丸成冰工艺 氘丸注入实验 等离子体分布变化

中图分类号:TB 69 文献标识码:A 文章编号:0253-9748(2001)01-0043-04

高密度运行和约束改善是托卡马克装置研究的重要研究课题之一,传统的边界充气加料很难适应现代大型装置实验研究。近年来,氢及其同位素的固态弹丸的高速注入技术已成为几乎所有的磁约束受控聚变装置的先进加料技术。

弹丸注入就是将氢或其同位素冷冻至对应三相点温度(氢及其同位素的典型物理特性如表 1 所示)以下成冰,再用先进加速技术将其高速注入到等离子体中实现固态加料。对托卡马克而言,弹丸注入与传统的边界充气加料相比,其优点在于:加料效率高;燃料粒子沉积深;粒子再循环小;提高了等离子体密度极限;改善了粒子约束和能量约束;而且用氘作燃料时可以更好地控制和统计氘的量^[1-6]。

目前,国际上大装置用于弹丸注入的丸料气主要用 D_2 ,这样加料后等离子体的氢氘比可以得到有效控制,从而有利于 ICRF 少数粒子辅助加热。在国内聚变研究中主要尝试氢(H_2)弹丸注入^[1,3,5],本文

首次报道了在 HT-7 托卡马克装置上尝试并实现了氘(D_2)丸注入的实验及初步结果。

表 1 氢及其同位素特性

Tab.1 Properties of hydrogen isotopes

同位素	克分子量 /g·mol ⁻¹	三相点 温度/K	三相点 压力/Pa	固态属性	
				密度/g·cm ⁻³	极限屈服 强度/Pa
H ₂	2.016	13.9	7.2	0.087	70~350
D ₂	4.028	18.7	17.2	0.20	210~530
T ₂	6.032	20.6	21.6	0.32	1030,1170

1 弹丸注入器

弹丸注入器是实现弹丸注入实验的关键设备^[1]。弹丸注入器按成冰方式可分为:原位冷冻式、挤压源式注入器以及类似“Zamboni”制冰机式的注入器;按加速方式可分为:气动力加速、离心式加速以及近年来为满足更高速注入发展起来的先进加速技术^[2]。

HT-7 托卡马克是我国第一个用于受控热核聚

收稿日期:2000-05-24

基金项目:国家自然科学基金重点课题资助项目(批准号:19789501)

变研究的超导托卡马克装置。根据 HT-7 托卡马克的实际参数及加料要求,本文选择了原位冷凝、气动力加速式弹丸注入器,其操作的原理如图 1 所示:

(1)开始,用真空泵抽除低温恒温器系统、枪管以及喷管中的杂质气体,冷池温度低于三相点温度后,从枪管的一端引入室温的丸料气。

(2)成冰,关闭进气阀,冷冻持续几分钟使丸料气填充弹丸芯部。

(3)抽除残余气体。

(4)发射弹丸,从枪管尾部引入高压驱动气体加速弹丸到等离子体。

图 2 是 HT-7 弹丸注入系统结构示意图,它包括弹丸注入器、驱动气发射及差分系统、远程控制与采集系统、低温及其回气系统、真空抽气系统等,构成了 HT-7 弹丸注入系统^[1]。

2 D₂ 丸成冰工艺的摸索

首次在 HT-7 装置上尝试 D₂ 丸注入实验,对弹丸注入器进行了系统的调试。在液氮条件下冻甲烷(CH₄)弹丸来调试注入系统的准直性;在液氦条件下摸索 D₂ 丸的成冰工艺。

2.1 准直

调试系统准直性时,在第二级扩散室(图 2 中 ch3)后装一麦克风,将 LBA1 和麦克风输出信号送至

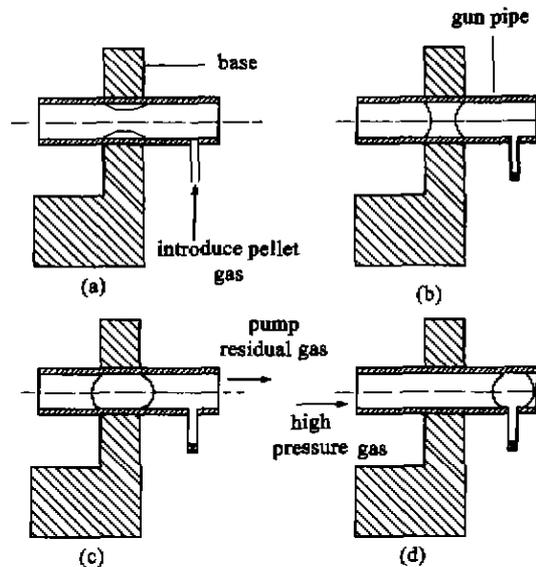


图 1 HT-7 弹丸注入器操作原理图

Fig.1 The operation principle of the HT-7 pellet injector

记忆型示波器, D₂ 丸形成并通过差分系统后测得典型的信号如图 3 所示。第一个尖峰表明 D₂ 丸成冰质量较高,振荡衰减信号表明 D₂ 丸顺利通过差分系统。已知 LBA1 和麦克风间距离,即可估计出 D₂ 丸进入等离子体前的速度 ($v \approx 1.2 / (2 \times 10^{-3}) = 600$ m/s)。

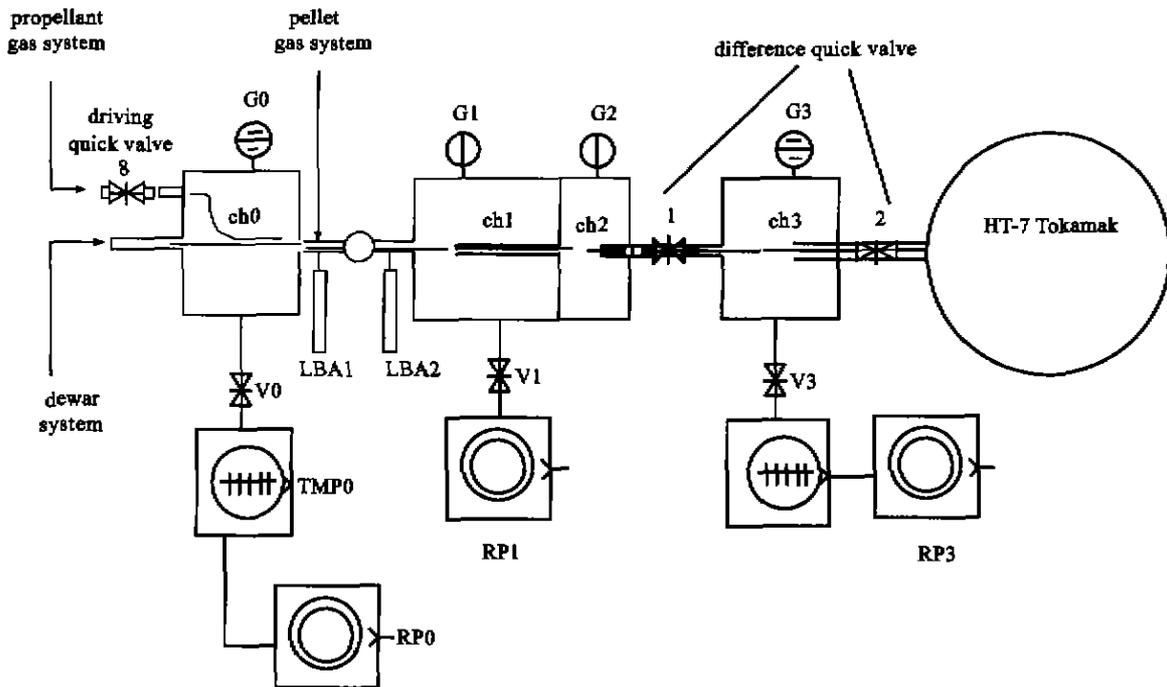


图 2 HT-7 弹丸注入系统结构示意图

Fig.2 The structural schematic diagram of the HT-7 pellet injection system

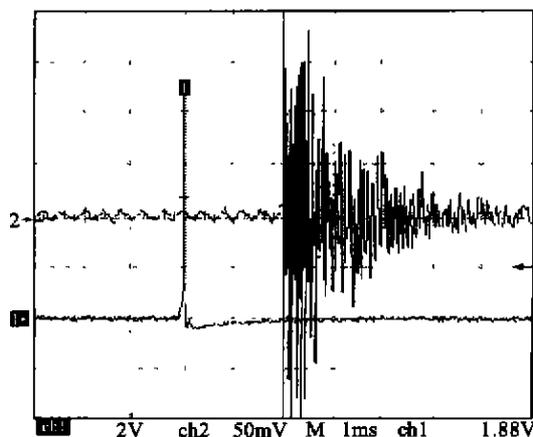


图 3 氘丸穿过差分系统时的典型诊断信号

Fig. 3 The typical diagnostic signal of D_2 pellet through the differential system

2.2 工艺摸索

D_2 丸成冰时,影响 D_2 丸成冰质量的因素很多,主要有成冰的温度、成冰的气压和 D_2 气的导入方式、成冰时间、驱动气压等,通过台面实验基本摸清了满足 HT-7 装置等离子体放电的 D_2 丸成冰工艺。

(1)成冰温度 合适的成冰温度对 D_2 丸的形成至关重要,成冰温度可以通过反馈控制的 LHe 供给系统加以调节。成冰温度较高,不能形成 D_2 丸或者形成的 D_2 丸不致密,在加速过程中易破碎,弹丸的速度也较低;成冰温度太低, D_2 丸致密而紧紧附着于枪管的壁上,要用很高的驱动气压(达 4 MPa 仍然存在延迟发射)才能将 D_2 丸与管壁脱附而加速。通过测量每根枪管与低温恒温器交汇处的热电阻的电阻来表征成冰温度,阻值与温度一一对应。定义成冰率为发射过程中能被 LBA1 捕捉到的 D_2 丸与总 D_2 丸数之比,发现成冰率与热电阻阻值 R_T 的对应关系如图 4 所示。在 600~800 Ω 时成冰率最高,对应的温度为 13.0~14.6 K。

(2)成冰气压及 D_2 气的导入方式 根据成冰原理,只要成冰温度低于 18.7 K(见表 1)时引入纯 D_2 的气压高于该温度下固态 D_2 的饱和蒸气压即可生成 D_2 丸。尝试了两种进气方式与气压的组合:(a)小流量缓慢注入方式;(b)大流量快速注入方式。发现大流量快速注入方式(气压 0.02~0.04 MPa)对控制直径 1 mm 以上的大弹丸比较有利,小流量缓慢注入方式(气压 0.005~0.020 MPa)对控制直径 0.5 mm 左右的小弹丸比较有利。具体的进气方式则根据 HT-7 等离子体放电决定。

(3)成冰时间 成冰时间对 D_2 丸的质量有一定

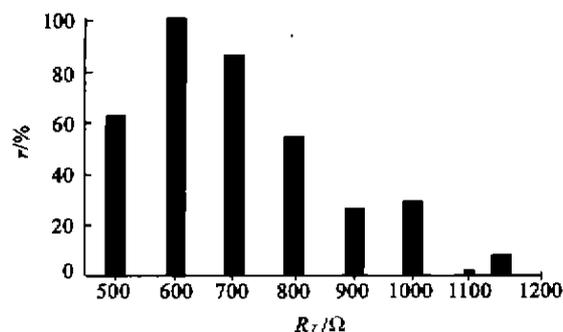


图 4 温度对氘丸成冰的影响

Fig. 4 The temperature's influence on the D_2 pellet formation

的影响。若成冰时间超过 5 min,形成的 D_2 丸较长易断裂成两段;成冰的时间小于 1.5 min,发射的 D_2 丸极易破碎,有时甚至不能形成 D_2 丸;因而成冰时间一般以 2~5 min 为宜。对 HT-7 Tokamak 等离子体放电时间间隔为 7 min 左右,完全有足够的时间控制 D_2 丸。

(4)驱动气压 对理想情况下弹丸在枪管中加速时任意时刻的速度^[4],已给出理论公式。弹丸的速度与弹丸的质量、驱动气气压以及驱动气的当地声速有关。对 D_2 丸,驱动气是高纯室温氮气(即当地声速一定),驱动气压越高, D_2 丸的速度也越高,但逐渐趋于饱和。这与 S. L. Milora 的理论基本一致。对 HT-7 托卡马克装置,驱动气压在 2~4 MPa 即可成功地将 D_2 丸注入用于实验放电。

此外,残余气体的抽除时间、发射弹丸的数量对弹丸的质量以及驱动气压对弹丸加速速度的影响还有待进一步的实验与研究。

3 D_2 丸注入等离子体的实验条件概述

D_2 丸注入加料实验时 HT-7 放电等离子体主要参数:大半径 $R = 1.22$ m,小半径 $a = 0.28$ m,磁场 $B_T = 1.8 \sim 2.0$ T,等离子体电流 $I_p = 100 \sim 150$ kA,电子密度 $n_e = (0.6 \sim 1.5) \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$,电子温度 $T_e = 400 \sim 1000$ eV。参与 D_2 丸注入实验的主要诊断技术有:垂直方向 5 道 HCN 激光干涉仪(分布在 $r = -20, -10, 0, 10, 20$ cm)多道快扫描电子回旋辐射(ECE)测量,垂直方向以及水平方向多道软 X 射线二极管阵列,34 道光电二极管阵列(D_s)辐射测量等。

4 D_2 丸注入等离子体放电实验的初步结果

4.1 密度分布和粒子约束

D_2 丸注入能显著地改变等离子体的密度分布, 以 Shot:30719 为例, D_2 丸在 288 ms 时注入, 由 5 道 HCN 诊断观察到了信号电子弦平均密度上升及峰化现象(如图 5 所示), $N_{e1} \sim N_{e5}$ 均先上升而后缓慢下降, 单发 D_2 丸注入密度增量接近 40%~60%, 约 60 ms 后恢复到注入前的水平。 D_2 丸注入前后电子密度分布如图 6 所示。从图 6 可以看到, 注入后密度分布明显趋于不对称, 可能是由于 D_2 丸未注入到等离子体芯部的原因。 D_2 丸注入后的一瞬间, 密度分布趋于平滑、分布变宽, 而后开始峰化, 峰化因子随时间的变化如图 7 所示, 这一峰化现象伴随离子热扩散率的下降, 粒子约束得到改善。

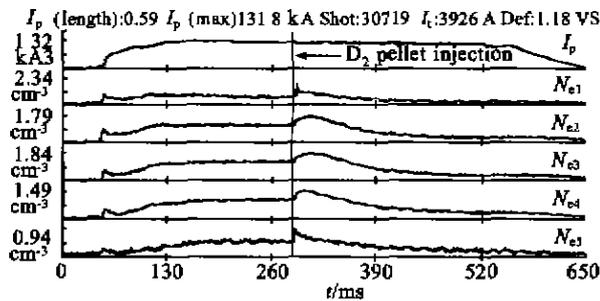


图 5 氘丸注入引起的密度增加

Fig. 5 The density increment produced by D_2 pellet injection

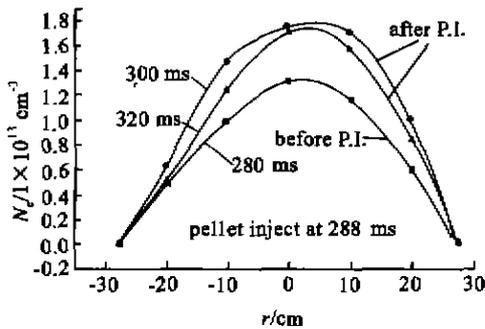


图 6 D_2 丸注入前后电子密度的分布

Fig. 6 The density profiles before and after D_2 pellet injection

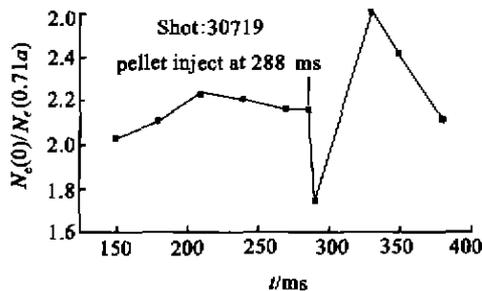


图 7 峰化因子随时间的变化

Fig. 7 The peaking coefficient evolving with time

4.2 电子温度的变化

低温的 D_2 丸注入高温等离子体中, 对其温度分布的影响同样与 D_2 丸注入的深度有关。仍以 Shot:30719 为例, 由中心道 ECE 信号(如图 8 所示)看到, 电子温度先下降, 然后恢复; 而在其它装置上一些深度弹丸注入时, 由于粒子沉积较深, T_e 整体下降甚至产生中空的温度分布^[5]。

4.3 氢氘比的控制

D_2 丸注入降低了 HT-7 托卡马克等离子体的氢氘比($H/(H+D) \times 100\%$), 由注入前 50% 降到注入后 10% 左右, 为 D_2 丸注入 ICRF 少数粒子加热提供了良好的靶等离子体。

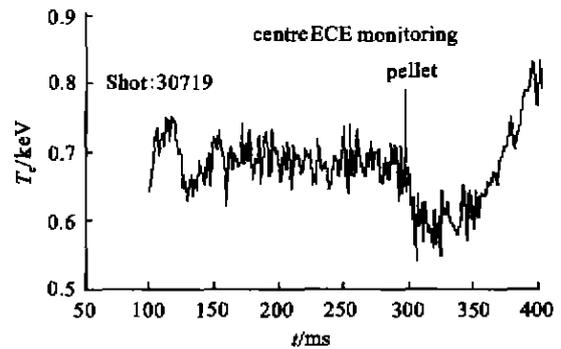


图 8 D_2 丸注入引起的温度下降

Fig. 8 The temperature decrement produced by D_2 pellet injection

5 结论与讨论

通过实验摸索了 D_2 丸加料成冰工艺, 当弹丸注入器的枪管中温度在 13.0~14.6 K, 进气气压为 0.5~4.0 Pa, 成冰时间在 2~5 min, 驱动气压在 2~4 MPa 时, 即可基本满足 HT-7 托卡马克欧姆放电条件下的实验要求, 能显著改变等离子体的电子密度和电子温度的分布, 并有效控制氢氘比。

HT-7 托卡马克装置 D_2 丸注入与 ICRF、LHCD 波的联合实验研究将在今后的论文中报道。

作者感谢童心德老师在实验调试期间在工程、控制上给予的帮助、感谢 HT-7 装置运行组提供了良好的靶等离子体、感谢 HT-7 真空组的同志在真空设备维护上给予的帮助。

(下转第 66 页)

线,该图表明,发射电流与阳极电压的关系近似于指数关系,其 F-N 曲线接近于一条直线。由此可以初步证明为场致发射。如假设金刚石薄膜的发射仍满足经典的 F-N 公式,则由该曲线的曲率和截距可求出金刚石薄膜的有效功函数 $\Phi \approx 0.025 \text{ eV}$ 。

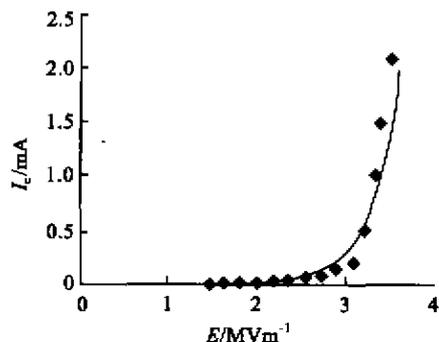


图 4 发射电流与电场间的关系曲线

Fig. 4 Dependence of the emission current on electric fields

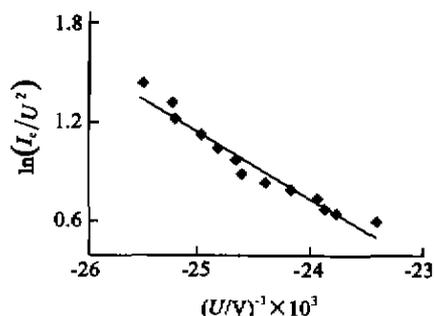


图 5 发射电流与阳极电压的 F-N

Fig. 5 Fowler-Nordheim plot for the diamond film

2 结论

场发射电子的开启电场和更大的发射电流以及其稳定性和可靠性是场致发射的主要指标。在铜基

上沉积未成膜的、散状分布的金刚石微小颗粒作为发射体可以有效地降低场发射电子的开启电场。本实验所制备的金刚石薄膜发射体的(宏观)开启场小于 2 MV/m (对应的发射电流大于 $10 \mu\text{A}$,发射电流密度大于 0.5 mA/cm^2),最大发射电流大于 2.08 mA ,最大发射电流密度大于 100 mA/cm^2 ,相应的电场强度为 3.45 MV/m 。本文所得金刚石薄膜场发射体开启电压较低的原因在于金刚石薄膜可以看成由很多微小的金刚石发射体微尖锥组成,当颗粒间的间距较大时,发射体尖顶部的场增强因子更大。又因为采用了导电性能优异的金属——无氧铜作为发射基底,有利于在金刚石与基底间形成良好的欧姆接触,所以有利于电子的发射。

参 考 文 献

- 1 廖复疆.真空微电子器件及其应用.中国电子学会真空电子分会第十一届学术年会论文集,1997:14
- 2 庄学曾,夏善红,刘光诒.电子科学学刊,1997,19(5):689
- 3 Bozler C O *et al.* J Vac Technol B, 1994, 11(2):629
- 4 Zeng B Q, Yang Z H. J Vac Sci Technol B, 1999, 17(1):1
- 5 Himpel F J, Knapp J A, Van Vechten J A. Phys Rev B, 1979, 20:624
- 6 de Heer W A, Châtelain A, Ugarte D. Science, 1995, 270(5239):1179
- 7 Okano K, Koizumi S, Ravi S *et al.* Nature, 1996, 381(6578):140
- 8 Xu N S, Latham R V, Tzeng Y. J Phys D, 1993, 26:1776
- 9 Adler A, Bardai Z, Forman R *et al.* IEEE: ED, 1991, 38(10):
- 10 Joffreau P O, Haubner R, Lux B. Refrac Hand Metals, 1998:186
- 11 韩祀瑾,陈金松,方容川等.物理学报,1998,47(4):686
- 12 Narayan J, Chen X. J Appl Phys, 1992, 71:3795

(上接第 46 页)

参 考 文 献

- 1 杨 恩,鲍 抑,辜学茂等.真空与低温,1999,5(3):139~143
- 2 Combs S K. Rev Sci Instrum, 1993, 64(7):1679~1698
- 3 Yang Y, Bao Y, Gu X U *et al.* Nuclear Fusion, 1999, 39(11Y):1871~1874
- 4 Nagami M. Nuclear Fusion, 1993, 33(10):1583
- 5 肖正贵,刘德权,李 波等.核聚变与等离子体物理,1999,19(1):21~26
- 6 Milora S L, Houghberg W A, Lengyel L L *et al.* Nuclear Fusion, 1995, 35(6):657~755