

28-31

5

1996年第6期
总第94期低温工程
CRYOGENICSNo. 6 1996
Sum No. 94

HT-7托卡马克的八管弹丸注入器

胡立群

TL631.24

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

A摘要 介绍了用于HT-7托卡马克的八管弹丸注入器的物理、工程设计原理和结构特点及配置的各种诊断手段。注入器采用气动发射技术,弹丸为 $\phi 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, $\phi 1.2\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$, $\phi 1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 圆柱体氢丸,丸速 $0.8 \sim 1.5\text{ km/s}$,工作频率 $1 \sim 8\text{ Hz}$ 。

主题词 八管弹丸注入器 托卡马克 低温

HT-7托卡马克是一个长脉冲、稳态运行的装置,补充托卡马克因燃烧、扩散等粒子损失机制而不断减小的燃料,维持等离子体长脉冲运行将是弹丸注入器的主要任务之一。更重要的是希望借助于弹丸注入,使等离子体密度具有中心峰值分布的形式,这将不仅有利于等离子体稳定和平衡、改善约束,使波的可近性条件容易形成,有利于射频加热和电流驱动。同时控制弹丸消融位置(控制弹丸尺寸、速度、入射角度),可在较大范围内改变等离子体密度和温度分布剖面,从而可比较各种分布下粒子约束和输运特性;还可研究弹丸的消融机制及弹丸和等离子体的相互作用。

弹丸注入是一项综合性的技术,涉及低温、真空、气体动力学、自动控制 and 诊断等技术。经过十几年发展,内容已相当丰富,目前弹丸速度小于 1.5 km/s 的注入器技术已相当成熟。考虑到HT-7托卡马克实际情况,采用八管原位冷凝式弹丸注入器,弹丸为 $\phi 1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$, $\phi 1.2\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$, $\phi 1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的圆柱体氢丸,速度为 $0.8 \sim 1.5\text{ km/s}$,工作频率为 $1 \sim 8\text{ Hz}$ 。

1 原位冷凝式弹丸注入器工作原理

“原位冷凝”概念是由法国原子能中心G. Claudet首先提出的^[1],即丸料气在冷冻腔内直接被冷凝吸附成冰丸,并被原位发射。如图1所示,采用连续低温恒温器结构,用冷头将喷管和枪管连成一体,即用一根薄壁不锈钢管从冷头中穿过,冷头使管的局部降温,在管内形成一个低温“冷凝腔”,丸料气进入冷凝腔后便被连续冷凝吸附最终形成弹丸。冷头、喷管和

枪管上都设有温度计和电加热器,用于冷头的温度控制(控制弹丸长度)和弹丸发射前的瞬间加热。通常这些加热器可保证在靠近冷凝腔几毫米距离内枪管和喷管与冷凝腔的温度梯度高达20~30 K。其制丸周期如下:

①预备,真空泵抽除低温恒温器系统及枪管、喷管中的杂质气体,操作加热器,使冷凝腔两边形成高温梯度;②制丸,从喷管和枪管

两个方向送入丸料气,使送气结束后冷凝腔中的气体压力 p_c 等于丸料气在冷凝温度 T_c 时的饱和蒸气压 p_s ,丸料气将在冷凝腔内连续冷凝吸附形成固丸;③待发,抽除系统内的残余丸料气,在约9 K保存弹丸;④发射,脉冲开启电加热器使弹丸与冷凝腔壁脱附,开启快阀喷入高压推进剂加速弹丸使其从枪管中射出。

原位冷凝式和其它形式如挤压式^[3]相比,尽管弹丸物理制造过程复杂、参数多元化,而且制丸周期较长,弹丸尺寸也不太精确,但由于省去了许多机构,特别是低温下的密封、动作机构、避开了一些技术难点,增加了制造工艺性,容易改变弹丸长度即改变弹丸尺寸,所以得到迅速发展,多发弹丸注入器基本上都采用原位冷凝式结构。

2 弹丸参数选择

弹丸加料效率和等离子体密度分布峰化程序是和弹丸在等离子体中的贯穿深度 λ 密切相关的, λ 由弹丸速度、尺寸、等离子体密度 n_e 和温度 T_e 决定。弹丸尺寸的选择主要取决于实验所要求的密度增量,其上限受到等离子体破裂不稳定性及加热功率、效率的限制,下限则受到弹丸在等离子体中的贯穿深度 λ 及加工可能性限制。弹丸最大速度主要决定于所采用的注入器类型,对原位冷凝式气动发射注入器,弹丸速度最大值 $u_{max} \approx 1.5 \text{ km/s}$ 。

通常采用和实验、理论较好符合的定标律来进行估算:

$$\tau_p = 3.47 \times 10^7 n_{e0}^{-1} T_{e0} - 1.64 r_{p0}^{5/3} (\text{s})$$

τ_p 为弹丸寿命, $T_{e0}(\text{eV})$ 为等离子体中心温度, $n_{e0}(\text{cm}^{-3})$ 为等离子体中心密度, $r_{p0}(\text{cm})$ 为弹丸半径。以我们所选定的 $\phi 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 、 $\phi 1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 、 $\phi 1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 三种尺寸弹丸,对应的等离子体密度增量分别为: $1.45 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、 $2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、 $4.9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。 $\phi 1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 可用于将来弹丸中心贯穿实验。如使用引导管,还需考虑25%的丸料传输损失。

3 八管弹丸注入器

该八管弹丸注入器的低温恒温器中心部分是用八根薄壁不锈钢管从低温恒温块中穿过并成轴对称分布,所以可以认为注入器是由八个单元枪构成,并且其结构使得各单元枪之间热干扰小于别的类型多管枪,即如果多管不是同时发射时,已发射的枪管驱动气体对未发射的枪管加热作用不大,所以可根据实验需要选择每次放电所需的弹丸数目。如图2所示,该八管弹丸注入器主要由四部分组成:①弹丸制备;②弹丸发射;③气体处理;④弹丸诊断。

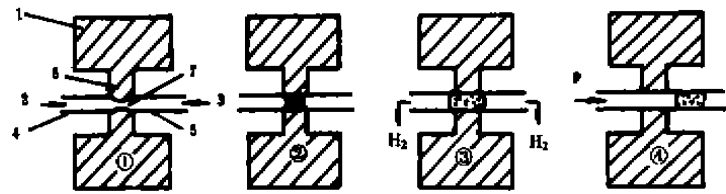


图1 原位冷凝式弹丸注入器工作原理

1. 低温恒温器 2、3. 丸料气 4. 喷管 5. 枪管 6. 冷头 7. 冷凝腔
①进丸料气 ②形成弹丸 ③抽走多余气体 ④高压驱动气体发射弹丸

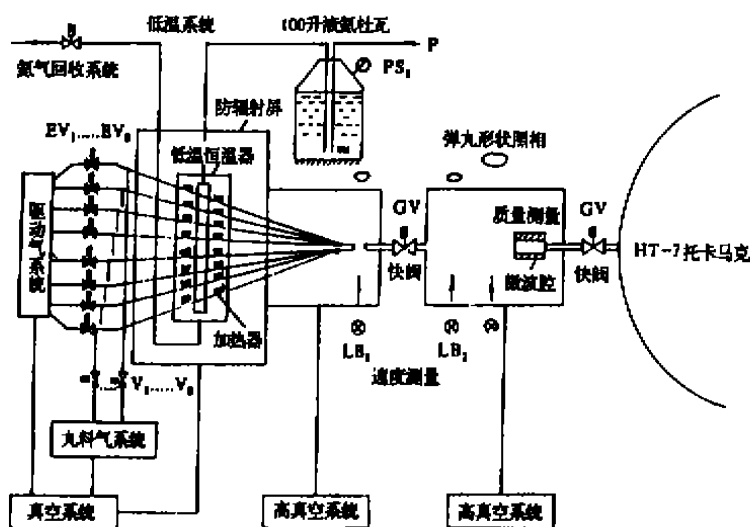


图2 HT-7八管弹丸注入器示意图

弹丸制备的关键在于冷凝腔的形成, $p_s < p_c < p_{cmax}$ (丸料气三相点压力), 由图3可知, 控制冷凝腔两边温度梯度及温度差 $\Delta T = T_1 - T_2$ 可改变弹丸长度。控制 ΔT 的有效办法是控制丸料气的冷凝温度, 即改变丸料气进气压力。弹丸速度取决于弹丸所受的实际背压, 这受到快阀性能、喷管长度及容积的制约, 通常实际背压只有驱动气体压力的 $1/5 \sim 1/3$ 。

类似于单发弹丸注入器, 该八管弹丸注入器也有三套独立真空系统, 第一套用于低温恒温器真空绝热, 真空度 $\sim 1.33 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ (10^{-6} Torr); 第二套为差分真空系统, 且带有大的扩散真空室, 使加速弹丸的推进气体在此段被真空泵抽走, 为此还配有罗兹泵及气阻, 尽量减小进入下级容器的气体; 第三套用于测试段, 在此容器内, 进入的气体被进一步抽除以满足托卡马克允许的气体流量之要求 (一般把进入托卡马克的气体质量小于弹丸质量的 1% 作为真空排气系统的统计指标), 同时在此容器内可进行弹丸质量及速度测量, 离散角测量及完成弹丸形状照相。在第二级、第三级及托卡马克之间均装有快速闸阀限制进入的气体质量。

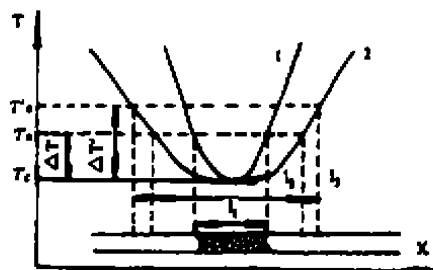


图3 温度梯度和温度差对弹丸长度的影响

4 弹丸参数诊断

4.1 速度测量

遮光法是最常规的方法。它是在弹丸弹道的法平面设置两束和弹道相交的光束, 由光敏元件阵列来接收, 弹丸通过时遮断光路产生信号, 反映弹丸有无及其坐标, 由两信号的时间差或坐标差即可算出弹丸速度和散射角。

4.2 弹丸质量测量

较为精确地直接测量是采用微波腔测量法, 其原理是根据弹丸穿过微波腔时, 腔内电介质条件发生变化所引起的共振频率 Δf 的变化来进行的。显然, 电介质条件的变化取决于弹丸材料、弹丸质量及其在腔内的瞬间位置。 Δf 测量有两种方法: 由微波腔功率变化来确定或把

微波腔作为频率振荡器的一部分,测频率变化来确定微波腔共振频率的变化。此方法还可测到弹丸的完整性、是否中空等信息。

粗略测量可根据弹丸注入后等离子体密度增加值或制造弹丸时供气量来推算,还可采用气压法即将弹丸射入一封闭容器,根据弹丸完全蒸发后容器压力来推算弹丸平均质量。

1.3 弹丸散射角

在容器中放置靶,根据弹着点分布来判断或采用 4.1 方法来进行。

1.4 弹丸形状、状态

采用高压火花隙或脉冲氙灯照明拍摄飞行中的弹丸,曝光时间 $< 10^{-7}$ s。或采用高摄影机拍摄弹丸飞行过程的一组照片,由此判断弹丸的完整状况、形状及速度等。

参 考 文 献

1. Lafferrandiere J, Claudet G *et al.* Experimental test of 6 mm diameter D₂ pellets producing by "in-situ" condensation. Proc. of 14th Symp. on Fus. Technol., 1986
2. 胡立群. 弹丸注入器的调试. 低温工程, 1996; (2)
3. Vinar I, Kuteev B *et al.* Single and multishot "in-situ" pellet injectors at St. Petersburg technical university. IAEA Technical Committee Meeting on Pellet Injection, 1993

EIGHT-BARREL PELLET INJECTOR FOR HT-7 TOKAMAK

Hu Liqun

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

ABSTRACT This paper briefly describes the physical engineering design principle, structure characteristic and pellet parameter diagnostic means of 8-barrel pellet injector for HT-7 Tokamak. This injector uses gas dynamic acceleration technique and pellets made of hydrogen are three size cylinders of $\phi 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, $\phi 1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$, $\phi 1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ with velocity 0.8~1.5 km/s and work frequency 1~8 Hz.

KEYWORDS eight-barrel pellet injector; tokamak; low temperature