

144-147

技术交流

HPI 弹丸注入器

胡立群 何也熙[√] 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

1995年2月6日收到

THE HPI PELLET INJECTOR

TL612.11

Hu Liqun, He Yexi, Wu Songtao

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

A **摘要** 叙述了 HPI 弹丸注入器的结构特点、工作原理及液氮冷凝条件下甲烷弹丸的制造及发射实验。结果表明,该注入器产生的弹丸具有较好的重复性和完整性,并且在整个弹丸制造、加速及传输过程中质量损失极少。目前已得到速度约 450 m/s, 散角小于 0.3° 的 $\phi 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 圆柱体甲烷弹丸。

关键词 弹丸注入器 等离子体加料 核聚变

1 引言

在过去的10年里,毫米量级冷冻弹丸高速注入加料已成为研究受控热核聚变中磁约束等离子体的前沿技术,技术水平及参数也有了质的飞跃^[1]。人们之所以对弹丸注入如此感兴趣,不仅因为它是聚变装置有效的加料手段,更重要的是它可用作改变等离子体密度和温度分布剖面的行之有效的手段,从而可在较大范围内影响等离子体的基本特性,能够比较和观察各种分布下粒子约束和输运特性,为等离子体物理研究提供了良好的实验手段。

2 HPI 弹丸注入器结构特点及工作原理

本弹丸注入器是以 HT-6M 型托卡马克为靶,采用当时国际上典型的挤压式旋转切割气动枪结构^[2],其特点在于弹丸通过挤压形成,抗拉强度大,弹丸可得到较大的速度,且重复性好。

图1示出了 HPI 弹丸注入器的总体结构图,它主要由固体弹丸制造、气动加速、真空获得和测量四大部分组成。

弹丸制造是在绝热的低温恒温器中完成的(见图2)。当真空度低于 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 后,通入低温冷凝剂冷却低温恒温器,回流冷气通过管式热交换器冷却镀金防辐射屏。进入的丸料气先经过管式热交换器预降温到防辐射屏温度后,再进入恒温块压缩腔内冷凝成霜,利用制冰活塞上下往复运动将霜压制冰条。然后电加热恒温块,并使枪机不锈钢转筒旋转 90° 至“装裁”位置,推进活塞将冰压进转筒上的小孔里,然后停止加热并使转筒反转 90°,从冰条上切下弹丸并使之位于发射位置,此时圆筒转子上小孔和驱动气源相通,再降温后即可开启快速

电磁阀将弹丸加速至预定速度(见图3)。弹丸直径及长度分别为转筒上小孔的直径和转筒厚度,这里均为1 mm。

注入器有两套独立的真空系统,分别用于低温恒温器真空绝热及抽除弹丸发射后的剩余弹射气体。从结构上,注入器可分为三级:第一级为恒温器外真空室,它是恒温器绝热的条件。由于枪机为不密封结构,不仅丸料冰升华产生的气体会进入此级真空室,而且每次发射弹丸时也会有很多气体漏入真空室,加之转动密封的漏气,要求真空机组应在几分钟内使系统真空度恢复到 10^{-1} Pa;第二级为差分系统,即采用扩散室、气阻和快速关断闸阀来逐级降低弹丸发射后的弹射气压力,保证仅有少量气体漏入下级;第三级进一步抽走剩余弹射气体,使进入托卡马克的气量限制在允许漏量约 1.33×10^{-1} Pa·L 以内。

弹丸尺寸取决于实验所要求的燃料密度增量,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穿透深度及加工可能性的限制,通常满足 P. B. Parks 的中性气体模型^[2]。

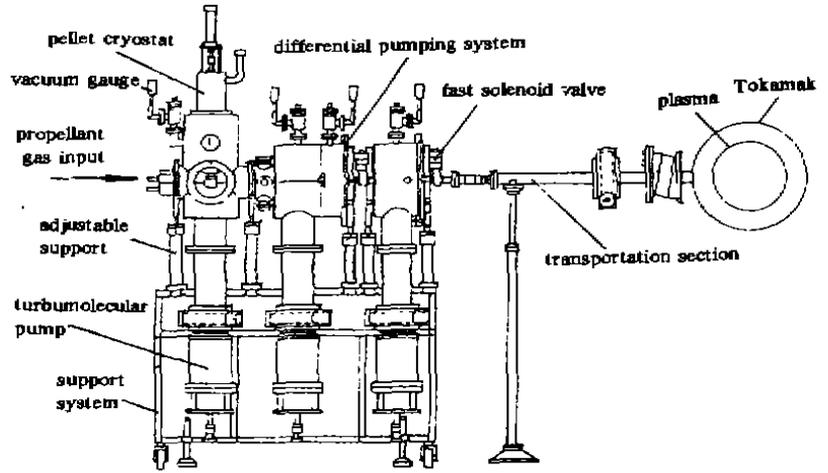


图1 HPI 弹丸注入器总体结构图
Fig. 1 HPI pellet injector assembly

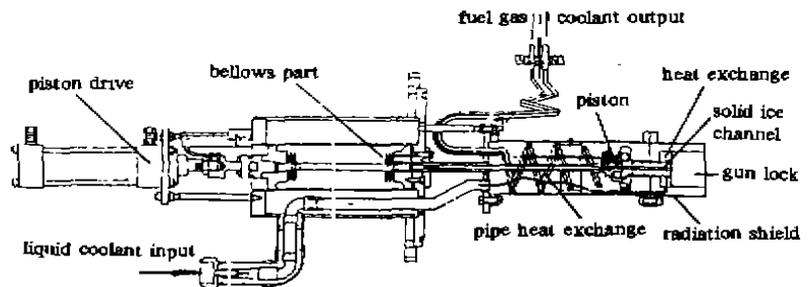


图2 HPI 弹丸注入器低温恒温器结构示意图
Fig. 2 HPI pellet injector cryostat assembly

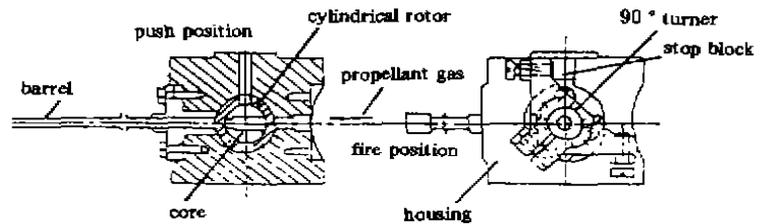


图3 枪机结构示意图
Fig. 3 Gun lock assembly

$$dr_p/dt = -3.1 \times 10^6 n_e^{-1} n_p^{-1} T_e^{0.54} r_p^{-2.5} m_p^{-1.5} \quad (1)$$

式中 r_p 、 m_p 、 n_e 、 n_p 和 T_e 分别为弹丸半径(m)、分子质量(amu)、弹丸粒子数浓度(m^{-3})、等离子

体电子浓度(m^{-3})和温度(eV)。

弹丸速度则由弹射气压 p_0 和枪管长度 L 决定,如仅考虑弹射气为可压缩气体的理想情况,即忽略弹丸在加速管内和管壁摩擦,弹射气和管壁的热传输、粘滞、漏气等非理想效应,有如下方程^[4]

$$m_p \frac{du_p}{dt} = p_0 [1 - (\gamma - 1)u_p / (2c_0)]^{2\gamma/(\gamma-1)} \quad (2)$$

$$c_0 = \gamma RT / m \quad (3)$$

式中 c_0 , γ , T 和 m 分别为弹射气声速、比热比、温度和分子量; m_p 和 R 分别为弹丸质量及普适气体常数。

3 注入器调试及实验

选用液氮作冷却介质,甲烷作弹丸丸料气,按图4所示进行了注入器调试及发射实验。因为液氮条件下形成甲烷丸和液氮条件下形成氢丸有着相似的关键成冰条件,即冷却介质和丸料气三相点温差相似。注入器调试发射的关键在于真空低温系统正常可靠地工作。

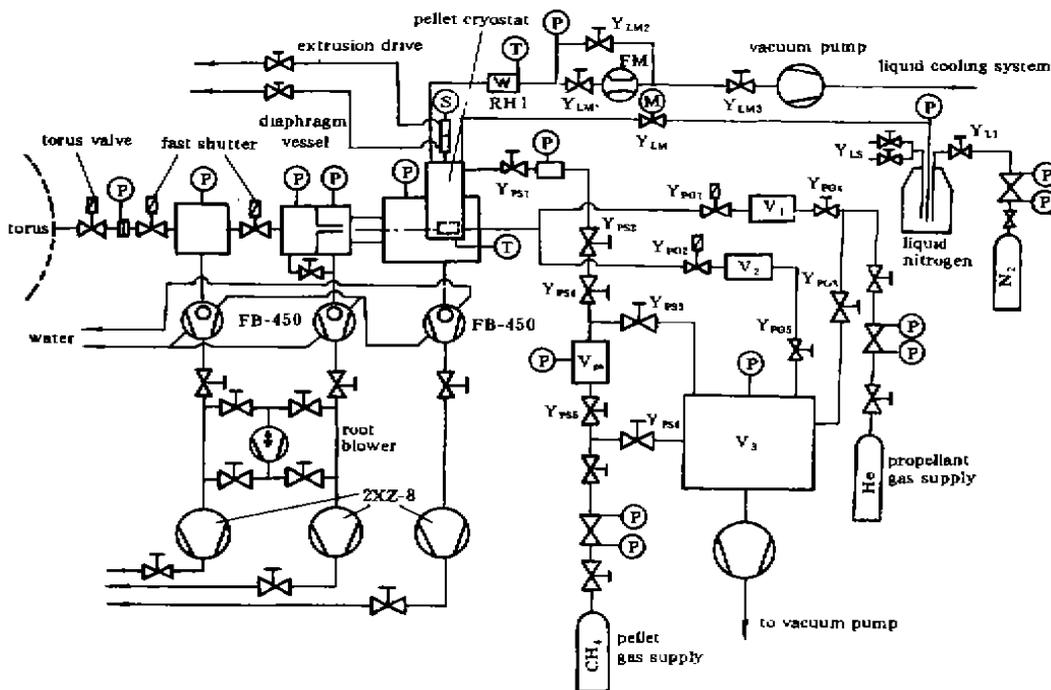


图1 注入器发射实验系统布局

Fig. 4 Schematic arrangement of injector tests

由于弹丸是通过枪机旋转切割而成,所以系统清洁及丸料气体纯度至关重要,否则会冻住制冰活塞或枪机,造成制冰或切丸失败。枪机和转筒采用钢丝密封、密封过紧,真空度好,但影响转筒转动;密封过松,恒温器真空度过低,影响其工作状态。

为了判断是否生成 CH_4 冰,摸索生成的 CH_4 冰质量和丸料气压力、恒温块温度的关系,将枪机中定子掏空,换为质量相当的示范枪机,直接观察 CH_4 冰的透明度、颜色,从而模拟恒

温器工作状态,即成霜、制冰及切割弹丸的工作过程。

由调试结果可得注入器的工作参数:①挤压氢冰温度为86~88 K,此温度区域内,丸料气可直接冷凝成霜,挤压成冰,而且少量的氢冰挤入缝隙中,起到润滑剂的作用。如温度过高,冰可塑性太好,易将冰挤入缝隙中,在真空中升华,增加真空泵负载;温度过低,冰可塑性不好,易脆,挤不出冰条。②圆筒转子切割冰条温度为84~86 K,切割冰条温度过低时,氢冰变硬,难以切下或破碎,而且挤压过程中挤入缝隙的少量氢冰会形成牢固的冰,使圆筒转子不能转动。③弹丸制成后,弹射温度为82~84 K,在此弹射温度下弹丸变得坚硬、室温的高压弹射气体加速弹丸的瞬间,弹丸不易破碎、熔化。

根据调试得到的参数进行了弹丸发射实验,图5为典型的一组(23发)弹丸在距枪管(长400 mm)枪口1 m处、厚为0.2 mm的铝靶上弹着点示意图,黑点大小基本上表示了凹状弹坑的大小(约1 mm)。除6发跑靶外其余均命中,其中最大偏离中心6 mm。由靶着弹点看,弹坑均匀,且每发只有一个弹坑。由此可得到弹丸发射成功率约79%,离散角 $< \pm 0.3^\circ$,尺寸约1 mm,弹丸完整性和重复性尚好。

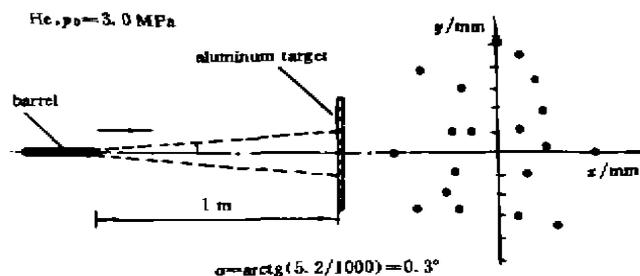


图5 厚0.2 mm,(直径15 mm)铝靶上弹着点示意图

Fig. 5 Pellet hitting points at the aluminum target

4 结束语

本注入器用甲烷作丸料气,并采用液氮冷冻技术,成功地制造并发射出了甲烷弹丸。弹丸发射实验结果表明:注入器设计合理,能正常、可靠地工作,弹丸重复性和完整性均好,制造、发射和传输过程中弹丸质量损失很小,速度可达450 m/s($\phi 1$ mm $\times 1$ mm圆柱体弹丸),离散度 $< \pm 0.3^\circ$,达到设计要求。调试所掌握的弹丸生成、发射条件,低温恒温器及注入器有关器件的调试经验和工作参数,对进一步液氮冷冻条件下氢弹丸制造、发射实验有着重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Milora S L, Combs S K *et al.* IAEA-TECDOC-534. 1989, 239
- 2 Andelfinger C. IPP-1/219, 1983
- 3 Parks P B. Nucl Fusion, 1977; 17(3): 539
- 4 Landau L D. Fluid Mechanics. 1959