

EAST 弹丸注入系统及其工程调试

李长征 胡建生* 陈跃

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

Development of Novel Pellet Injection System for
Experiment Advanced Superconductive Tokamak

Li Changzheng, Hu Jiansheng*, Chen Yue

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

Abstract A novel type of pellet injector was designed, fabricated, bench-tested, installed and tried in the experimental advanced superconductive tokamak (EAST). The discussions centered on the operating principle, design considerations, structures, and commissioning of the pellet injector as well as the time evolution of the injected pellet. The newly-developed pellet injector is capable of continuously fabricating and injecting a number of pellets at a time interval up to 100 s with reliability better than 99.6%. The cylindrical pellet, 2 mm long and 2 mm in diameter, can be injected at a frequency of 1~10 Hz, an adjustable injection speed of 150~300 m/s. The tested results show that the pellet injector works fairly well with high efficiency and reliability.

Keywords EAST, Pellet injection, Engineering commissioning, Injecting experiment

摘要 超导托卡马克(EAST)弹丸注入系统能够连续制备和发射多颗弹丸,其能够在连续100 s的弹丸发射过程中保证可靠性大于99.6%。弹丸形状为直径2 mm,长度2 mm的圆柱体,注入频率1~10 Hz,注入速度150~300 m/s可调。目前,弹丸注入系统已经安装在EAST装置上,经过台面测试和联机调试,证明系统性能可靠。本文主要介绍了弹丸注入系统的组成、原理、调试以及相关弹丸注入等离子体改变其行为的实验结果。

关键词 EAST 弹丸注入系统 工程调试 注入实验

中图分类号: TL629.1, 2⁺ 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1672-7126.2013.05.11

弹丸注入是等离子体加料的主要手段之一。与普通充气加料方式相比,弹丸注入加料具有更高的加料效率和更深的燃料粒子沉积,可以获得更加纯净的等离子体^[1]。同时,弹丸注入还可以改善等离子体的性能。如提高等离子体密度;降低粒子在器壁的滞留,改善边界再循环,提高等离子体约束性能;改变高约束模(H模)等离子体放电的边界局域模的行为,改善H模等离子体放电性能,降低第一壁热负荷^[2]。EAST自2006年建成投入实验以来参数不断提高,更于2010年分别实现了大于60多倍能量约束时间高约束模式(H模)等离子体放电,100 s 1500万度偏滤器长脉冲等离子体放电,最高等离子体平均电流达1 MA。为满足EAST高参数、长脉冲等离子体运行要求,中科院等离子体所与俄罗斯培林实验室(PELIN Laboratory Ltd.)合作研制

了一套弹丸注入系统,工程调试获得了良好结果,并已在本轮物理实验中投入使用。

1 弹丸注入系统的构成和工作原理

EAST弹丸注入系统主要由以下子系统组成:挤压制冰器系统,丸料气体和推进气体的供气系统,真空扩散系统,液氦冷却系统,诊断系统(弹丸速度测量等)和自动控制系统。弹丸注入系统的结构概貌如图1所示。

挤压制冰器系统是由俄罗斯培林实验室研制的^[3]。其主要由真空室、挤压杆、挤压驱动器、弹丸切割器、快速电磁阀、液氦蒸汽调节阀和压力和温度传感器等构成。其优点是可以根据实验要求,实现单发弹丸注入和连续多发弹丸注入的快速切换,成冰质量高,切割成型时弹丸完整性好。图2给出了

收稿日期: 2012-07-19

基金项目: 低再循环准稳态高约束模式的实验研究(2011GB107000)

*联系人: Tel: (0551) 5591353; E-mail: hujs@ipp.ac.cn

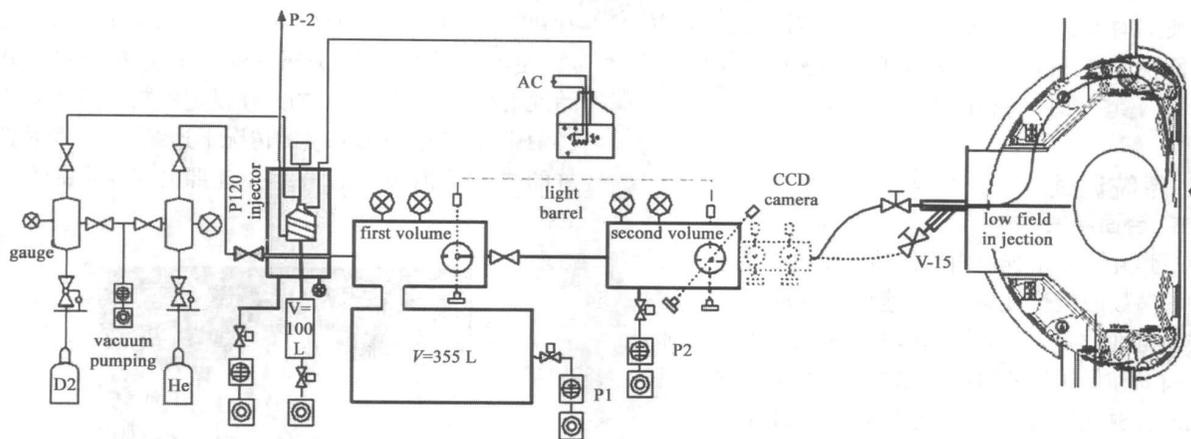


图 1 EAST 弹丸注入系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the EAST pellet injection system

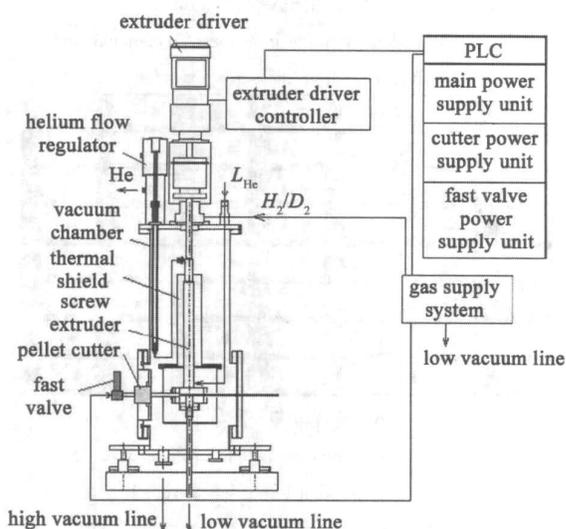


图 2 挤压制冰器结构示意图

Fig. 2 A schematic diagram of the pellet injector PF-20

挤压制冰器的结构示意图。

真空扩散系统的主要目的是抽出弹丸推进气体氦气,防止其进入装置,引入杂质和影响装置真空度。采用二级扩散,第一、二级扩散室体积为 15.7 L,缓冲室体积为 355 L,一级扩散和二级扩散的主泵为抽速为 1200 L/s 的 FF-200 分子泵;弹丸制备器本身的真空热绝缘维持采用抽速为 100 L/s 的抽气机组;同时为了有效抽除连续制冰和发射弹丸过程中产生的大量废冰和废气,与挤压切割器连接一个 100 L 的缓冲罐并配备一干泵机组抽气。经过理论计算,稳态运行下二级扩散室真空不高于 1.67×10^{-4} Pa 的压强,这样的气压再经过管道与装置相连,基本可以忽略对装置真空的影响。

EAST 弹丸注入器制冰过程中需要提供一定流量 (15 L/s) 及温度的液氦蒸汽用于冷却加料气体,且蒸汽绝对压力不可高于 0.13 MPa。为实验期间系统的稳定可靠运行,采用从低温系统引入液氦在注入器入口出将其加热气化到指定温度及压力以便制冰使用。液氦供给系统的示意图如图 3 所示。液氦管道从内置低温泵分配阀箱引致 EAST 装置水平 A 窗口下方。在注入器入口处布置一段加热丝 (最大加热功率 45 W)、热电偶和压力传感器,并通过 PID 仪表反馈调节,保证进入注入器的液氦蒸汽温度大于 5 K,压力不高于 0.15 MPa。实验中,降温过程中液氦消耗量约为 0.7 g/s,降温到位时间约为 2.5 h。

挤压制冰器的工作原理: 首先将制冰器系统抽真空,然后启动液氦冷却系统对制冰器进行降温,至成冰温度后,从供气系统将燃料气体引入冷凝池并被液氦冷却成霜,挤压杆在步进电机的旋转下将燃料气体挤压成冰从底部直径 2 mm 的管道推出,与冰柱垂直的切割器包含一个直径 2 mm 的薄壁圆管,在电磁力的作用下水平运动并切割冰柱形成直

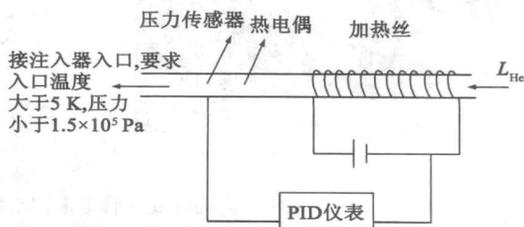


图 3 弹丸注入器液氦供给示意图

Fig. 3 Schematic drawing of liquid helium supply for pellet injector

径长度均为 2 mm 的弹丸。成冰之后切割器尾部的快阀快速打开高压气涌入管道中加速弹丸从出口飞出进入真空扩散室和诊断室。

2 系统调试

2.1 台面测试

弹丸注入系统台面测试的主要目的是系统设计相关参数的检验,以及不同速度与频率下弹丸注入器稳定性的测试。联机调试的主要目的是测试弹丸在高场和低场注入时的可靠性。台面测试和联机调试的燃料气体为氘气,压力 0.4~0.5 MPa,推进气体为纯度为 99.99% 的氦气,压力 0.2~0.3 MPa。测试中,使用液氘杜瓦供给液氘并采用加热丝加热液氘获得液氘蒸汽,冷却燃料气体。

测试之前,对整个系统进行常规检查,如切割机能否正常工作。然后按照操作规范启动泵组,挤压制冰器真空室的真空度应小于 1 Pa,扩散室真空度应低于 5×10^{-3} Pa。之后,打开制冰器的所有电子单元和 PLC 逻辑控制器,打开工业计算机,启动控制程序。打开燃料气体和推进气体气源,将供气系统管路抽空,分别用燃料气体和推进气体置换相应的送气管路,保持管路的纯净^[4-5]。连接液氘杜瓦,并用加热丝对其进行加热,开始加热参数设置为 $I = 1.60$ A, $V = 20$ V,液氘蒸汽进入制冰器开始冷却燃料气体,在此过程中每 15 min 记录温度和真空度等参数。观察控制界面温度参数的变化,当液化器温度 T_1 小于 20 K 和挤压机温度 T_E 小于 12 K,即可开始制丸,在控制界面上设置推进气体压力、注入频率、挤压机的转速等参数,按下 standby empty,开始填料,大概 15 min 后,进气阀门关闭,进入 standby full 状态,挤压器开始工作,1~2 min 后,可在观察窗

看到“冰柱”的出现,如图 4 所示。挤压过程结束之后,通过控制界面的 continuous or single 按钮可以开始发射弹丸。图 5 给出的是在设定参数为注入频率 10 Hz,注入速度 300 m/s 的情况下连续 100 s 发射弹丸的情况下拍摄到的一组弹丸照片,其可靠性为 100%。

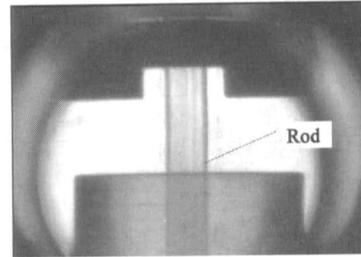


图 4 CCD 相机观察到的冰柱

Fig. 4 Solid deuterium ice in shape of rectangular rod pushed away from the screw extruder

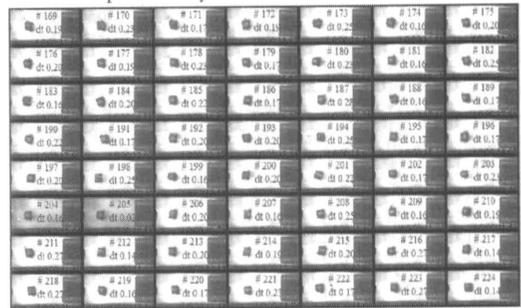


图 5 连续 100 s 发射弹丸

Fig. 5 Deuterium ice pellets in flight after acceleration (from left to right)

2.2 联机调试

联机调试的主要目的是测试弹丸发射以后,通过传输管道进入 EAST 装置的稳定性和可靠性。其中,低场侧注入管道长约 4.5 m,高场侧注入管道长

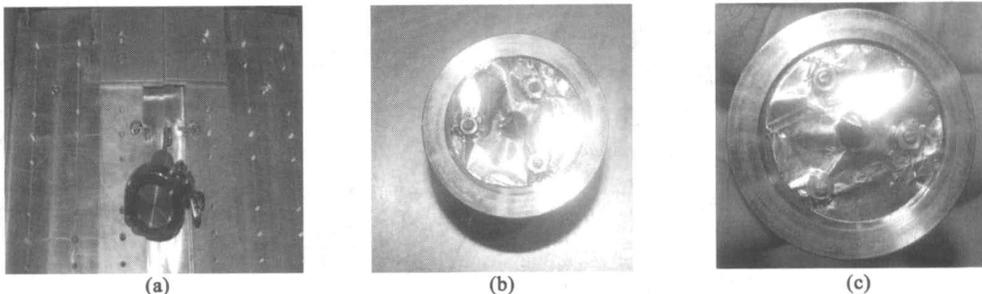


图 6 (a) 装置内高场注入管道末端与铝箔连接; (b) 弹丸注入后,低场侧铝箔被弹丸击穿; (c) 弹丸注入后,高场侧铝箔被弹丸击穿

Fig. 6 (a) A tool made of aluminum-foil is connected with the tube on the high field side (HFS), (b) aluminum-foil installed on the low field side (LFS) has been penetrated, (c) aluminum-foil installed on HFS also has been penetrated

约 9.5 m。前期准备工作与成冰过程与台面测试大致相同。为了监测弹丸能否通过传输管道进入装置,在高场和低场注入的管道处连接了铝箔,通过观察弹丸发射后铝箔的变形情况进行判断。图 6 给出了联机调试的测试结果。

3 弹丸注入对等离子体行为影响实验

2012 年 EAST 春季实验,分别进行了低场和高场的弹丸单发和多发注入实验。弹丸注入后,引起了等离子体参数一系列变化。最明显的变化是等离子体密度上升,Ha 线辐射增强,CIII 和 OII 等杂质辐射也增强,电子温度降低以及软 X 射线辐射强度降低等。图 7(高场注入单发弹丸)和图 8(低场连续注

入 9 发弹丸)分别给出了相关的实验结果。

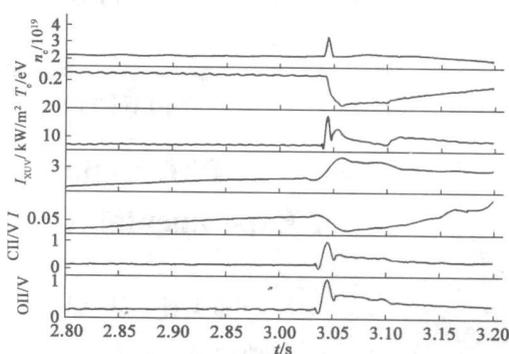


图 7 38098 炮, 3 s 注入弹丸后的放电曲线

Fig 7 Discharge waveform of a single pellet injected at 3 s on shot 38098

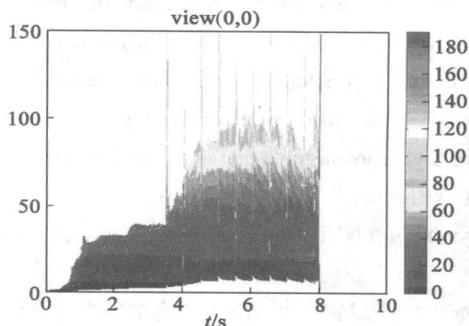
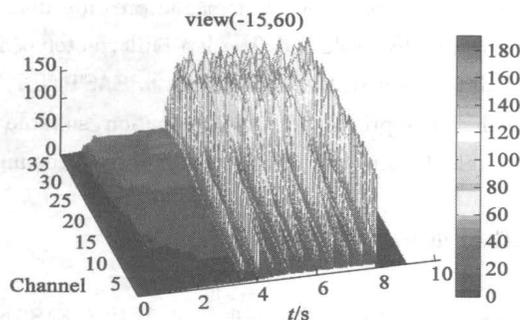


图 8 41878 炮, 3.5 s 开始连续注入 9 发弹丸 Ha 变化剖面图

Fig 8 The Ha profiles of 9 continuous pellets injected from 3.5 s on shot 41878

4 总结

EAST 弹丸注入系统经过台面实验和工程调试,成功制出高质量的氘冰柱并切割、发射了氘弹丸,最高发射频率达 10 Hz。在长时间连续工作的情况下仍能保证很高的稳定性。EAST 弹丸注入系统分别首次实现了从低场和高场的弹丸注入等离子体,并取得了一些初步实验结果。这些都表明了 EAST 弹丸注入系统很好地完成了设计目标。同时,在实验中也发现了一些问题,如连续 100 s 注入弹丸时将产生过多的废冰和废气;以及速度较快的弹丸经过长距离的传输管道破损和消融问题。下一步计划是针对这些不足之处进行改进和完善,为弹丸注入系统进一步参与物理实验提供更好的平台。

参 考 文 献

[1] 杨 愚. HT-7 弹丸注入系统与实验研究[D]. 合肥: 中

科院等离子体物理研究所, 1999

[2] Igor Vinyar. Hydrogen/ Deuterium Ice Pellet Injector PF-20 for EAST Tokamak [M]. Saint Petersburg Russia; PELIN LLC, 2011

[3] Baylor L R, Jernigan T C, Colchin R J, et al. Characteristics of ELM Activity and Fueling Efficiency of Pellet Injection from Different Locations on DIII-D[J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 290, 398-401

[4] 徐红兵, 刘德权, 朱根良, 等. HL-2A 装置挤压切割弹丸注入器及其工程调试[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(4): 135-138

[5] 成永军, 李德天, 张涤新. 极高真空校准室内残余气体的成分分析[J]. 真空科学与技术学报 2010 30(1): 54-58

[6] 胡立群, 何也熙, 武松涛. 挤压式旋转切割弹丸注入器[J]. 真空与低温, 1995, (2): 63-65

[7] Ge'raud A, Bucalossi J, Loarer T, et al. Pellet Fuelling in Tore Supra Long Discharges[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 337, 485-489