

⑨ 115—120

第20卷 第2期

核聚变与等离子体物理

Vol. 20, No. 2

2000年 6月

Nuclear Fusion and Plasma Physics

June 2000

文章编号: 0254-6086(2000)02-00115-06

HL-1M 装置超声分子束流注入过程中的团簇现象

姚良骅¹, 冯北滨¹, 冯震¹, 罗俊林¹, 董贾福¹, 严龙文¹, 宋显明¹, 高翔², 夏承遗²

(1. 核工业西南物理研究院, 成都 610041; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 在 HL-1M 装置上最近改进后的超声分子束流加料实验中, 发现边缘等离子体的 H_α 线辐射信号沿大环方向呈现有序变化。在超声分子束注入入口附近区域, H_α 信号为长方形正脉冲, 类似于分子束注入脉冲, 而在远离注入入口区域的边缘 H_α 信号为负尖脉冲。在注入入口附近区域, 用静电探针测得的径向电子温度和密度在超声分子束注入期间分别下降和上升了一个数量级。CCD 相机拍摄分子束与等离子体相互作用产生的 H_α 线辐射强度分布等实验结果表明, 注入的“冷通道模型”可能是成立的。

根据高压气体射流形成团簇的经验定标律 $\Gamma^* = kd^{0.85} \rho_0 / T_0^{2.20}$, 通常 $\Gamma^* > 100$ 即有可能出现团簇。本实验中 Γ^* 的值约为 127, 有可能形成团簇。分子束流中出现团簇有利于增加注入的深度。在超声分子束注入过程中呈现的新实验现象与团簇的联系有待进一步研究。

关键词: 超声分子束; 团簇; 加料; 托卡马克

中图分类号: TL62⁺9.1;

文献标识码: A

HL-1M 装置

1 引言

对 HL-1M 等离子体用超声分子束流注入加料, 引起密度峰化和约束改善, 其主要机理归结为加料粒子的注入深化和密度上升率(注入效率)的提高^[1,2]。在 HL-1M 装置实验中, 用改进后的超声分子束流注入 HL-1M 等离子体, 利用边缘 H_α 线辐射、径向可伸缩的静电探针和顺着束流注入方向的 CCD 摄像等诊断技术, 考察了粒子注入入口及注入入口附近区域电子温度和密度沿径向分布的变化, 研究了分子束粒子注入等离子体的所谓“冷通道模型”^[2]及其效应。

对粒子束注入模型的研究要涉及到注入粒子束本身的性质, 这正是该课题的物理学基础。可以设想, 注入粒子可能会通过某种化学或物理的相互作用而形成相对稳定的微观或亚微观聚集体^[3]。如果这样, 由于团簇的出现, 注入粒子的“消融”和电离过程需要消耗更多的等离子体电子能量, 从而延伸了注入深度。本实验的结果初步证实了这一设想, 即超声分子束流形成

收稿日期: 1999-12-29; 修订日期: 2000-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19775011)

作者简介: 姚良骅(1938-), 男, 上海市人, 研究员, 硕士, 1962年北京大学技术物理系核物理专业毕业, 1966年中国科学院原子能研究所研究生毕业后留所工作, 1969年调核工业西南物理研究院, 从事核聚变与等离子体物理实验研究。近十余年来, 在 HL-1 和 HL-1M 装置上开展等离子体与壁相互作用、超声分子束用于核聚变与等离子体加料的研究。

团簇的可能性。

2 实验布置

HL-1M 装置是一台中型托卡马克,大环半径 $R = 1.02\text{m}$,等离子体半径 $a = 0.26\text{m}$,环向磁场 $B_T = 3\text{T}$,等离子体电流 $I_p \leq 350\text{kA}$ 。由于 HL-1M 装置真空室尺度和抽气速率的限制,难以建立完整的超声分子束注入系统。另外,作为气体加料,也不必过高地要求束流的准直性和速率的分散性。因此,在 HL-1M 装置超声分子束注入系统的设计中未采用分流器和准直器,主要通过减小出口孔径和提高气源气压来提高束流的品质和粒子通量,实际上这是一个射流(free jet)注入系统^[4]。

超声分子束注入线位于大环赤道平面以下 9cm 处,注入方向垂直于 HL-1M 装置的环形等离子体,注入口距离等离子体中心约 64cm,与冰弹丸注入线平行并使用同一窗口。该窗口为跑道形,平行段长度和间距分别为 19.3cm 和 12.6cm。CCD 相机设置在窗口的赤道平面上方 8.7cm 处,其光轴与注入线的夹角为 13.4° 。在环形真空室注入段的上方设置光电二极管阵列,观测注入截面中 H_α 线辐射强度径向分布随时间的变化。分子束与等离子体相互作用示意图以及 CCD 相机和光电二极管阵列的相对位置如图 1 所示。

SensiCam 360LF 型 CCD 相机是二维成像器件,其 VGA 卡分辨率为 $640(\text{水平}) \times 480(\text{垂直})$ 个像素点,相机工作温度为 -15° ,以降低热噪声。相机配有变焦镜头,聚焦于等离子体中心。镜头前干涉滤光片的中心波长为 656.3nm ,半宽度为 7nm 。其它有关 CCD 相机的参数可参见文献[5]。注入段等离子体竖直上方设置光电二极管阵列,阵列之前装有中心波长为 656.3nm 的干涉滤光片和宽度为 1mm 的狭缝。此探测阵列包括 20 只光电二极管探测器,能覆盖注入段整个等离子体圆截面。探测器采样频率为 100kHz ,时间分辨率为 $10\mu\text{s}$ 。

与本实验相关的诊断手段还有多道 HCN 激光干涉仪、单道真空紫外谱仪、可伸缩的静电探针、Mach 探针、边缘 H_α 光探测、多道辐射热探测计和电子回旋辐射谱仪等,沿环向布置如图 2 所示。

3 超声分子束流中团簇的形成

高压气体源通过小孔绝热膨胀,将随机的热能转化为平动能,在过饱和状态中发生凝聚生成团簇,即高压和低温气体形成的超声分子束中可生成超声中性团簇。这是一种典型的由原子、分子凝聚增长成为团簇的方法^[3]。在超声分子束中出现中性团簇的经验定标律为:

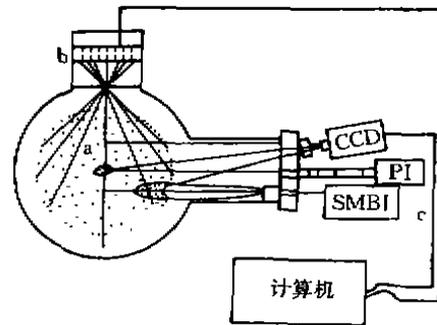


图 1 HL-1M 装置超声分子束注入段及诊断布置示意图

a——等离子体,b——PIN 光电二极管阵列,c——40m 长光纤,PI——冰弹丸注入器;
SMBI——超声分子束注入器。

$$\Gamma^* = \frac{k d^{0.85} p_0}{T_0^{2.29}} \quad (1)$$

式中 Γ^* 为 Hagen 参数; k 为常数, 取决于气体的种类, 对于 H_2 , $k=184$; d 为喷口直径; p_0 和 T_0 分别为气源的气压和温度。通常, $\Gamma^* > 100$ 即有可能出现团簇^[6]。在本实验中, $p_0 = 0.7 \text{MPa}$, $T_0 = 300 \text{K}$, $d = 0.01 \text{cm}$, 代入式(1)得 $\Gamma^* = 127$ 。稳态分子束存在的空间长度为 $x_M = 56 \text{cm}$, 超过束流出口到等离子体的距离。因此在超声分子束流中有可能出现团簇。

我们认为, 提高超声分子束流的速度和增加团簇包含的粒子数都有利于加料的深化。团簇内的粒子数 $N_c \propto \Gamma^{*2 \sim 2.5}$ 。因此, 降低气源的温度可以使团簇内的粒子数大大增加。比如 $T_0 = 40 \text{K}$, 则 $N_c = 10^4$ 。但是, 注入粒子(团簇)的速度又与 $T_0^{0.5}$ 成正比。超声团簇注入等离子体的效应需兼顾速度和颗粒大小, 以取得最佳的注入效果。

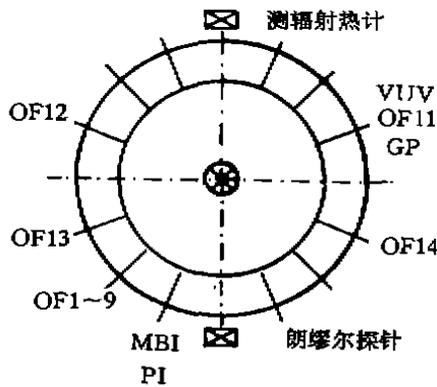


图 2 HL-1M 装置部分环向诊断布置图

OF1~14 —— 边缘等离子体 H_α 探测器; MBI —— 超声分子束注入; VUV —— 真空紫外探测器; GP —— 常规喷气口;

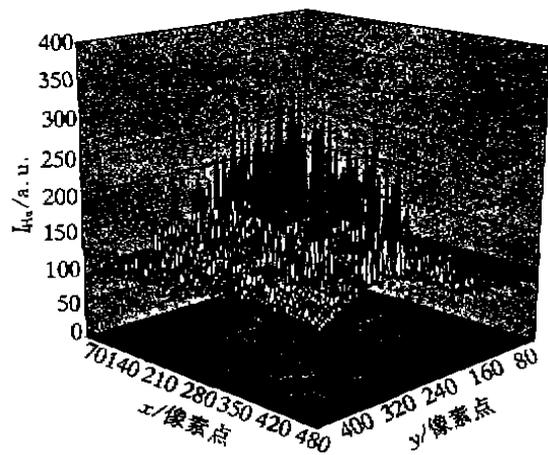


图 3 H_α 线辐射的强度分布

曝光时间 $0.3 \mu\text{s}$, x 轴长 19.3cm , y 轴长 13cm 。

4 实验结果和讨论

在分子束注入窗口的 CCD 相机拍摄常规喷气放电等离子体或低通量分子束注入放电等离子体, 得到的图象是一片亮光。当分子束注入的通量密度达到足够高时, 用 CCD 相机可以拍摄到分子束与等离子体相互作用所产生的 H_α 线辐射沿大环外侧的强度分布, 如图 3 所示。高压气体通过小孔射流, 前方粒子密度呈圆锥形扩张。根据文献^[7]对密度分布测量的结果, 沿喷射的中心轴线密度是相同的。距离喷射中心轴线 y 处粒子密度为:

$$n(y) = \frac{n_0}{1 + \alpha y^2} \quad (2)$$

式中 n_0 为喷口处密度; α 为系数, 取决于喷口形状和气源气压。按式(2)计算, 在本实验条件下, 分子束注入区域可维持氢分子密度约为 $1 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。而 HL-1M 边缘等离子体密度不高于 $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, 因此在分子束脉冲注入期间, 大量冷气体不可能全部电离。曾设想在注入段(区域)出现冷通道^[2,3], 其中是包含大量中性粒子的较低温度等离子体。这次实验 CCD 相机拍摄到的 H_α 图象相应于中性粒子密度最高的区域。我们设想, 超声分子束流与等离子体相互作用产生激波和扰动, 因此形成多个分立的 H_α 线辐射强度尖峰。环向距离注入口 22.5° 和 45° 处的边缘 H_α 信号呈现方波脉冲, 类似分子束加料脉冲信号的波形。45° 处静电探针在 $r = 23 \text{cm}$ 处测得的电子温度在分子束注入期间从 100eV 降至 10eV, 如图 4 所示, 表明这个温度较低的边缘等离子体区域在环向至少拓宽到 90°。分子束注入结束, 注入口 H_α 光团、边缘 H_α 方波脉冲和边缘 T_e 负脉冲立即消失。在较低再循环放电条件下, 距离注入口较远区域(135°)的边缘 H_α 信号甚至会出现负尖脉冲, 如图 4 所示。这表明高通量粒子注入会引起整个大环边缘电子温度的下降。

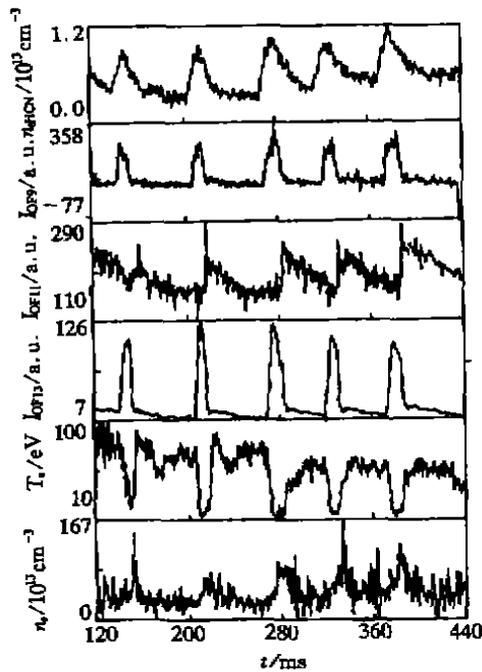


图 4 超声分子束注入期间边缘等离子体行为

n_{eHCN} 为中心电子密度; I_{OFS} 、 I_{OF11} 、 I_{OF13} 分别为边缘等离子体 H_α 探测器 OF9、OF11、OF13 测得的 H_α 强度; T_e 、 n_e 分别为静电探针在 $r = 23 \text{cm}$ 处测得的电子温度和密度。

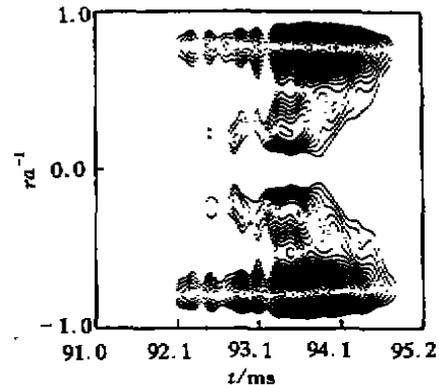


图 5 注入段 H_α 线辐射强度径向分布随时间的演变

超声分子束流注入等离子体的深度与等离子体的温度和密度紧密相关。超声分子束注入使边缘等离子体的温度下降, 有利于减小原子、分子的电离率。中性氧分子(团簇)与等离子体

的相互作用包括离解、激发、电离和电荷交换等过程。尤其是电荷交换在上述四种反应中在不同温度下的截面都为最大^[8]。带电粒子沿极向和环向运动速度极快,中性氢粒子(包括团簇)经由电荷交换沿径向和环向渗透等离子体的过程,可以从低激发态中性氢原子退激发光推测到。图 5 为注入段顶部光电二极管阵列测得的 H_α 辐射强度径向分布随时间的演变。从图上可以看到,分子束进入等离子体中心区的只是一小部分,大部分加料集中在等离子体边缘。中性粒子的径向分布大体上是对称的。

5 结论

HL-1M 超声分子束加料系统经改进后,粒子通量增加一倍。根据超声分子束形成团簇的经验(Hagena)定标律和注入段 CCD 相机拍摄到的注入口 H_α 光强的陡峭分布图象,可以初步断定在注入束流中出现团簇。多分子凝聚的团簇有助于延长注入等离子体的消融时间,有利于增加注入的深度。至于团簇的大小和它在束流中所占比例尚待进一步研究。

超声分子束注入加料的深度一直是人们感兴趣的问题,曾经提出过定向高通量粒子注入时边缘等离子体被冷却的状况。分子束注入不仅冷却了 CCD 相机拍摄到的 H_α 光团所示区域的等离子体,而且扩展到以注入口为中心的超过 1/4 环段的边缘等离子体,那里的温度在注入期间急剧下降。因此,粒子注入环向等离子体的范围也相应地拓宽。这与分子束加料密度峰化需要较长时间滞后的观测结果相符合。

本实验观测到的超声分子束流注入环形等离子体所产生的粒子集体运动行为,提出了一个需要从实验和理论(包括数值模拟)方面进行研究的课题。这项基础研究的任何进展都将有利于聚变等离子体的加料和偏滤器边缘等离子体的研究。

参考文献

- [1] YAO Liang-hua, TANG Nian-yi, CUI Zheng-ying, et al. Plasma Behavior with Molecular Beam Injection in the HL-1M Tokamak [J]. Nucl. Fusion, 1998, 38(4): 631.
- [2] 姚良骅,刘德权,周艳等. 超声分子束用于聚变等离子体加料 [J]. 核技术, 1999, 22(2): 79.
- [3] 李珩,刘向红,王秀岩. 分子团簇内的化学反应 [J]. 化学进展, 1999, 11(1): 60.
- [4] 姚良骅,唐年益,丁玄同等. 聚变等离子体加料的新方法: 超声束流注入 [J]. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊), 90.
- [5] 郑银甲,王瑞荣,冯震等. 用 CCD 相机观测 HL-1M 弹丸消融过程 [J]. 核聚变与等离子体物理, 1999, 19(3): 165.
- [6] Wormer J, Guzielski V, Stapelfeldt J, et al. Fluorescence Excitation Spectroscopy of Xenon Clusters in the VUV [J]. Chem. Phys. Letters, 1989, 159(4): 321.
- [7] Ditmire T, Smith R A. Short-Pulse Laser Interferometric Measurement of Absolute Gas Densities from a Cooled Gas Jet [J]. Optics Letters, 1998, 23(8): 618.
- [8] Wesson J. Tokamaks (Second edition) [M]. New York: Clarendon Press Oxford, 1997. 432.
- [9] SONG Xian-ming, SUGIE Tatsuo, YOSHINO Ryuji. A Simple Model of Supersonic Molecular Beam Injection [J]. J. Plasma and Fusion Research, 2000, 76(3): 282.

HYDROGEN CLUSTERING BEHAVIOR DURING SUPERSONIC MOLECULAR BEAM INJECTION INTO THE HL-1M TOKAMAK

YAO Liang-hua¹, FENG Bei-bing¹, FENG Zhen¹, LUO Jun-lin¹, DONG Jia-fu¹,
YAN Long-wen¹, SONG Xian-ming¹, GAO Xiang², XIA Cheng-yi²

(1. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041; 2. Institute of Plasma Physics, Academic Sinica, He fei 230031)

Abstract: The fuelling method with pulsed supersonic molecular beam has been improved in the HL-1M tokamak recently. The edge H_α signals show regular variation around the torus. Near-by the injection port, the edge H_α signals are positive rectangular wave, which is similar to the injection beam pulses. On the other hand, the H_α signals far from the injection channel appear as sharp negative pulses. During beam injection, the edge electron temperature and density measured with movable Langmuir probes decrease and increase by an order of magnitude within the injection sector, respectively. At the same time, the H_α intensity due to the interaction of the beam with toroidal plasma is congregated at the injection port. It is taken with CCD camera at an angle of 13.4° to the hydrogen beam injection line. The experimental results show that the hypothesis of "cold injection passage" should be valid, and a simple model for the "passage" has been discussed.

In the present experiment, hydrogen clusters may be produced in the beam. The onset clustering can be described by an empirical scaling law, $\Gamma^* = k d^{0.85} p_0 / T_0^{2.29}$. Usually clusters emerge if $\Gamma^* > 100$. In our experiment Γ^* is about 127. A supersonic beam with clusters will be beneficial to deepening injection.

Key words: Supersonic molecular beam; Cluster; Fuelling method; Tokamak