

·学科进展·

HL-1M 装置的加料和密度特性*

肖正贵 李波 李立 董贾福 姚良骅

刘德权 郭干城 邓中朝

(核工业西南物理研究院,成都 610041)

[摘要] 主要介绍了 HL-1M 托卡马克装置 3 种加料方式所得的密度特性结果。用弹丸注入 (PI), 超声分子束注入 (SMBI) 和常规脉冲送气 (GP) 获得等离子体电子密度 N_e 分别为 $5.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 和 $7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。前者获得的能量约束时间 τ_e 却比后者高 30% 以上。由 H^α 信号及软 X 信号 (SX) 的时空分布分析表明, 能量约束差别是加料粒子沉积区域不同所致。

[关键词] 加料, 弹丸, 超声分子束, 喷气

引言

等离子体加料和密度控制是磁约束核聚变基本研究内容之一。对当代实验装置它主要用于等离子体密度极限、加料效率、约束改善和输运特性的研究; 对未来的核聚变反应堆来说, 由于涉及到氙的回收和材料的活化, 加料效率的提高和保持稳态燃烧所需的连续加料显得格外重要。

中国环流器新一号 (HL-1M) 实验装置在国家 863 计划支持下先后研制成功单发和 8 发弹丸注入 (PI) 系统, 该系统与超声分子束注入 (SMBI) 和常规脉冲送气 (GP) 组成联合加料系统。它们相互配合进行了一系列放电实验, 取得了丰硕的成果^[1-5]。本文仅就等离子体电子密度, 改善约束特性与燃料粒子注入深度, 放电装置器壁再循环的关系等结果作一介绍。

1 加料系统组成

HL-1M 装置的弹丸注入和超声分子束注入的系统组成, 工作原理和结构特征已有专文论述^[6-8], 不在此重复。边界喷气是 2 套可靠、灵活、直观、稳定的微机控制送气子系统, 它由气源、管道、PV-10 阀门、真空泵、真空测量记录仪、智能微机控制器组成。送气口可沿装置径向伸缩 0—6 cm。装置放电本底

气压和补充送气量均可灵活方便地调节。由安装在装置上的真空计可准确测定出对装置真空室本底送气、补充送气、弹丸注入装置汽化后所对应的压力变化 ΔP 。由相同条件下放电等离子体电子密度的变化 ΔN_e 与 ΔP 之比值可以推算出各种加料方法的加料效率。

2 加料实验结果

核聚变装置真空室器壁再循环 (单位时间内碰撞器壁的分子个数与从器壁上释放出来的分子个数之比) 条件对放电密度有较大的影响。HL-1M 弹丸和超声分子束加料实验是在装置硼化或硅化处理和氦辉光放电清洗结束后器壁很干净的状况下开始。随着放电次数的增加器壁条件变化, 加料实验结果也有所不同。

2.1 低再循环条件下的放电

放电清洗刚结束后的干净器壁再循环很低, 加料粒子被器壁吸附, 使得加料效率低。如果只有本底送气 ($P_b = 5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$), 放电密度 N_e 值 $< 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 密度波形呈缓慢上升后的缓慢下降, 密度峰化系数 $Q_n = N_{e(0)} / \sqrt{N_e}$ (中心密度与平均密度之比) 约为 1.3。

多脉冲 (脉宽 15 ms) 分子束注入时密度波形呈锯齿变化, 其密度上升率 $dN/dt = 3-4 \times 10^{20}$

* 国家自然科学基金高技术重点项目。

本文于 1999 年 12 月 14 日收到。

$m^{-3}s^{-1}$, $Q_n = 1.3-1.4$, 密度峰化不明显(如图 1 所示)。

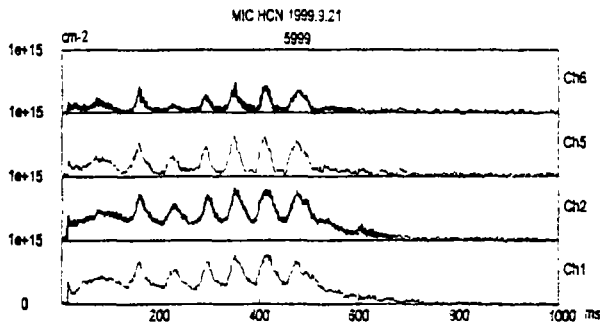


图 1 低再循环条件下分子束注入时密度的变化

在干净器壁条件下允许注入 8 粒弹丸, 其电子密度变化如图 2 所示。

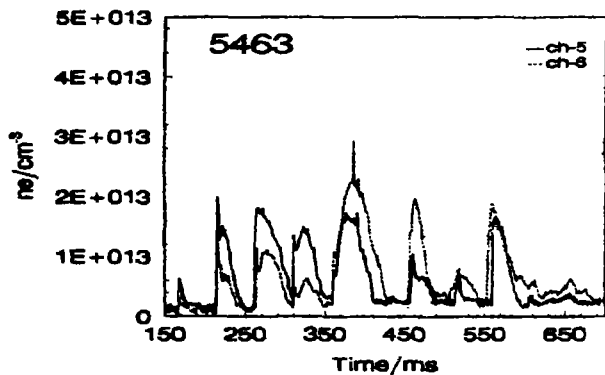


图 2 第 5463 次放电多道电子密度监测图
发射快闸分别于 150、200、250、300、350、450、550、600 ms 触发, 弹丸飞行 6—8 ms 到达等离子体

结果表明第一粒弹丸($\Phi 0.9$ mm)已经破碎, 电子密度扰动仅发生在等离子体小半径 $r = 11-6$ cm 的范围, 没有峰化现象。第 2 粒($\Phi 1.0$ mm)弹丸注入时, 各测量通道上的密度直线上, 然后按约 30 ms 的特征时间衰减。密度最高峰在装置 $r = 7$ cm 处。从第 3、4 粒弹丸注入开始, 外侧区放电密度波形先陡峭上升, 紧接着有一个小的下降(在 $r = 15-11$ cm 区域 5—10 ms 内), 然后再缓慢上升, 但其极大值不超过第一尖峰, Q_n 值约为 1.6。而中心区域密度只有第一尖峰值, 而后呈指数衰减(50—80 ms)。当第 5、6、7、8 粒弹丸($\Phi 1.4$ mm)注入时, 外侧($r = 15$ cm)密度上升尖峰已难以测出, 其紧接着的密度缓慢上升清晰可见。中心区密度只有快上升, 而后的缓慢衰减过程仍能观察到, 但没有 2 次上升

过程。这说明中心区域密度上升, 完全由弹丸加料引起, 且密度峰化以后主要向弱场侧扩散, 当中心密度扩散速率大于器壁的吸附率时, 出现外侧密度的缓慢 2 次上升。

2.2 再循环较大时的放电

HL-1M 装置内壁表层盖有大约 6% 的石墨, 随着放电次数的增加, 石墨由吸气(再循环小)到放气(再循环变大)成为新的粒子源。使放电本底 N_e 值(无补充送气)由 $< 0.4 \times 10^{19} m^{-3}$ 逐步上升, 最高可达 $2.5 \times 10^{19} m^{-3}$ 。这时弹丸加料放电的密度特性也发生了变化, 如图 3 所示。

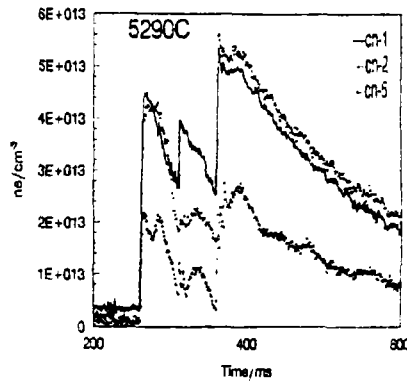


图 3 高再循环条件下弹丸加料的密度变化

第 1 粒($\Phi 1.0$ mm)弹丸注入, 每一道密度都呈现陡峭上升到第一峰值后的紧接下降现象。外侧下降约 10 ms 后出现 15 ms 的 2 次上升, 然后再缓慢下降, 2 次上升的极大值小于第一峰值; 中心区密度下降(5 ms)幅值较小, 之后保持平缓状态约 15 ms, 再出现缓慢下降; 强场区域密度陡峭上升到峰值, 然后一直呈下降趋势, 无 2 次上升过程。第 2、3 粒弹丸注入, 密度的 2 次上升时间更长, 上升值更大, 甚至超过第一峰值。中心区密度已出现平缓上升后缓慢下降的特点。随着弹丸注入数增加, 中心和强场区密度增加, 其值已达外侧区($r = 15$ cm)的 2 倍。密度峰值中心在 $r = 0-6$ cm(r 为负值为强场侧)之间, 密度更峰化 $Q_n > 1.8$ 峰化区变宽, 等离子体能量 $W_p = 6.0$ kJ 增加 3 倍, β_p 从 0.15 上升到 0.5, 超热辐射急剧下降, 能量约束时间($\tau_e = 26$ ms)比喷气放电增加 30% 以上, 已测定的弹丸加料实验密度为 $n_{e(0)} = 5.3 \times 10^{19} / m^3$ 。边界朗缪尔探针测量表明, 弹丸注入时在边界外侧密度升值通常是内侧的 2—3 倍。快密度增长率($dN/dt > 1 \times 10^{22} m^{-3}s^{-1}$)使密度快速高峰化, 与边界再循环提供的粒子相结合使等离子体整体密度升高, 约束改善。但是当放电温度不高

(< 1.2 keV)大弹丸(1.4 mm)连续注入会使得 HCN 激光干涉仪容易丢失差拍信号,以致测定不出密度信号。

高再循环下多脉冲分子束注入使如图 1 所示的锯齿状密度消失,代之以稳定的高密度放电,最大值达 $\bar{N}_e = 8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (shot 4 965, $I_p = 186$ kA, $B_t = 2.4$ T) $dN/dt = 3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $Q_n = 1.4-1.7$, $\tau_e = 25$ ms。与弹丸注入不同的是多脉冲分子束提供准稳态气流,使高密度持续时间较长(> 150 ms),但 Q_n 值不如弹丸注入高,且是逐步形成的,由注入初期的 1.4 升到后期(400 ms)的 1.6。

对常规脉冲送气,即便在低再循环条件下,用强本底脉冲($P_b = 2 \times 10^{-1} \text{ Pa}$)加长脉冲(250 ms)补充送气($2.6 \times 10^{-1} \text{ Pa}$)获得的最高密度为 $7.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $dN/dt = 4.4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ (shot 6079 $I_p = 150$ kA, $B_t = 2.0$ T)。 $Q_n < 1.6$, $\tau_e < 20$ ms。由此可见,长脉冲补充送气提供的粒子源弥补了边界再循环的不足,使放电密度高。

2.3 加料消融过程的研究

粒子消融和沉积过程通常是通过观察加料粒子注入截面上的原子或低电离离子的发光强度 (H_α 辐射)和多道软 X 射线(SX)辐射的时空分辨信号来研究。当等离子体电子温度超过原子或离子的电离势 $e\Phi_1$ 时,原子或低电离离子的发光强度 I 正比于弹丸消融率 N 。即通过 I 的变化来研究弹丸消融率 N 。

(1) H_α 线辐射测量

多道 H_α 线辐射测量是确定加料粒子沉积位置(穿透深度 λ_p)的直接依据。弹丸消融过程中产生的中性气体云始终包围着弹丸, H_α 辐射强度随消融率增加而增加, H_α 辐射峰随弹丸移动而移动。

当等离子体电子温度较高($I_p = 200$ kA, $T_e \approx 1250$ eV)弹丸只在外侧($r/a = 0.9-0.5$, a 装置的小半径)区域消融;大部分放电都在放电截面较宽,温度适当($I_p = 150$ kA $T_e \approx 1000$ eV)中进行,弹丸从近边沿开始到主要在中心区($r/a = 0.7-0.1$)消融;当放电截面较窄,温度不高($I_p = 150$ kA $T_e = 700$ eV)弹丸仅在近中心区($r/a = 0.3-0.1$)消融。弹丸注入速度在 $800-1000$ m/s 间,弹丸主要在中心区沉积,是加料获得峰化密度分布和约束改善的主要原因。

根据 PARKS 的中性气体屏蔽(NGS)模型,利用 HL-1M 的实验数据和最小二乘法,初步获得 HL-1M 的弹丸穿透深度 λ_p 定标为:

$$\lambda_p/a = \frac{1.19 \times 10^3 \times Z^{1/3}}{260} - \frac{1.18}{260}$$

$$\text{式中 } Z = \frac{d_p^{5/3} (nm) V_p (km/s)}{n_{e0}^{1/3} (10^{13} \text{ cm}^{-3}) T_{e0}^{5/3} (keV)}$$

d_p —弹丸半径, V_p —弹丸速度 n_{e0} —等离子体中心密度 T_{e0} —中心温度。

分子束注入的粒子大部分在边缘($r/a = 0.7-0.8$)消融,少量在中部区域($r/a = 0.5$ 附近)沉积,从密度峰化的时间性看出,分子束注入峰化密度是靠对流产生的,故其峰化速度和程度都不如弹丸加料,尽管目前测定的等离子体电子密度值高于弹丸加料。普通脉冲送气粒子完全在边缘区($r/a = 0.8-0.9$)消融,故其峰化程度更低。

如前所述,由补充送气、分子束、弹丸注入装置产生等离子体密度变化 ΔN_e 分别与装置不放电时注入燃料所对应的压力变化 ΔP 之比值推算出各种加料方法的加料效率 η 。普通送气 $\eta = 20\%-30\%$ 分子束 $\eta = 50\%$,弹丸注入 $\eta = 70\%-80\%$ 。显然,加料效率 η 与注入燃料沉积深度密切相关。

(2) 软 X 射线(SX)辐射

用中心区域软 X 射线强度在弹丸注入后(\dot{I}_{sx})与注入前(I_{sx})的变化来进一步研究弹丸粒子沉积的特征。

当弹丸注入深度较浅时,SX 强度变化很小($I_{sx}/\dot{I}_{sx} = 80\%$),装置放电由无锯齿转变为有突发性的 $m = 2$ 的振荡,出现幅度不大的锯齿叠加在 SX 信号上。在弹丸注入后约 30 ms 之后,软 X 射线在特征半径($q = 1$ 磁面)内形成不大的峰值,紧接着在该区域内发现锯齿反转。当弹丸注入到小半径的一半区域时($\dot{I}_{sx}/I_{sx} = 55\%$),软 X 射线强度逐渐增加,分布明显峰化,其粒子仅沉积在反转半径($r_s \leq 5$ cm)外,小的锯齿已经出现并限制了密度的峰化程度。当弹丸注入到接近 $q = 1$ 的磁面时,中心区域软 X 射线强度急剧下降, ($\dot{I}_{sx}/I_{sx} = 20\%$),表明中心电子温度的下降。锯齿在 20—50 ms 之内完全被抑制,或不出现 $m = 1$ 的扰动。SX 辐射和等离子体压强 P_e 在 $q = 1$ 的磁面内并只在该区域内较快地强烈峰化,峰化持续超过 50 ms,表明峰化不仅仅是密度的结果,粒子输运特性的改善也起了重要的作用。峰化在区域之外几乎没什么影响,看来 $q = 1$ 的磁面起到了输运壁垒的作用,使密度和电子压强峰化。分析表明,储能的 40%—60% 是由内部密度和电子压强峰化所贡献。SX 峰化在 $q = 1$ 的磁面内一直保持到爆发第一个大锯齿崩溃,然后在该区域内逐渐平化,锯齿

的出现限制了密度和进一步峰化的程度。

多脉冲分子束注入加料其速率不高。 T_e 没有明显的下降,而密度呈脉动上升,所以各区域SX强度出现与注入脉冲类似的同步增长,其峰化速度和程度也不如弹丸注入,这与 H_α 辐射测定的时空变化是一致的。

3 结论

HL-1M装置成功地用弹丸加料、分子束注入、常规脉冲送气3种加料方式进行了放电密度特性及约束改善的研究。实验表明装置器壁再循环条件对弹丸加料和分子束注入获得高密度放电影响较大。低再循环条件下不易获得高密度放电;高再循环条件下容易获得高密度放电,分子束注入获得了最高密度放电($\bar{N}_e = 8 \times 10^{19}/\text{m}^3$)。常规脉冲送气放电密度受低再循环的影响可由加强本底送气和长脉冲补充送气来克服。加料粒子消融过程分析显示,由于弹丸注入的粒子大多直接沉积于等离子体芯部,形成快而高的峰化密度分布,尽管其密度极大值不如分子束注入和常规脉冲送气,但其良好的约束使其能量约束时间26 ms最高,加料效率也最高70%—80%。

参 考 文 献

- [1] 肖正贵,刘德权,李波等. HL-1M装置多发弹丸加料实验观测. 核聚变与等离子体物理,1999,19(1):21.
- [2] 刘仪等. 弹丸注入实验中等离子体的约束改善特征和中心磁流体动力学特性研究. CNIC-01279,SIP-0105. 北京:原子能出版社,1998,11.
- [3] Xiao Z G, Liu D Q, Li B et al. Experimental Result of Pellet Fueling in HL-1M. Schweer B, Van Oost G, Vietzke E eds. Contributed Papers Vol. 23J P521—524. 26th EPS conf. on controlled fusion and plasma physics., Maastricht, 1999, 7:14—18.
- [4] Yao L H, Liu Y, Liu D Q et al. The Plasma Behavior with Molecular Beam and Pellet Injection in HL-1M. In: Schittenhelm M, Barliromo R, Wagner F eds. Europhysics Conference Abstracts. 24th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., Berchtesgaden, 1997. Geneva: European physical society. 1997, 21A(2):637.
- [5] Yao L H, Tang N Y, Cui Z Y et al. Plasma Behavior with Molecular Beam Injection in the HL-1M Tokamak, Nucl. Fusion., 1998, 38: 631.
- [6] 肖正贵,刘德权,李波等. HL-1M装置8发弹发射系统的研制及特性. 真空与低温,1997,3(1):12.
- [7] 刘德权,肖正贵,李波等. HL-1M装置的8发弹丸注入工程实验. 真空与低温,1999,5(2):103.
- [8] 姚良骅等. 聚变等离子体加料的新方法:超声分子束注入. 核聚变与等离子体物理,1998,18:90.

DENSITY PERFORMANCE OF FUELING ON HL-1M TOKAMAK

Xiao Zhenggui Li Bo Li Li Dong Jiafu Yao Lianghua

Liu Dequan Guo Gancheng Deng Zhongchao

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract The main experimental results with three type of fueling method used on HL-1M have been presented. The maximum electron densities of $5.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, $8.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ and $7.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ were obtained by Pellet Injection (PI), Supersonic Molecular Beam Injection(SMBI), and Gas puffing(GP) respectively. The energy confinement time τ_e of 26 ms obtained by PI is 30% greater than GP discharge, it is created by different depositing area of fueling particles.

Key words fueling, pellet, supersonic molecular beam, gas puffing