

- [3] S. Iijima , *Optik* , **48**(1977) ,193.
- [4] S. Iijima , *J. Appl. Phys.* , **49**(1971) , 5891.
- [5] L. D. Marks , D. J. Smith , *Nature* , **303**(1983) ,316.
- [6] R. Guan , H. Hashimoto , T. Yoshida , *Acta Cryst.* , **B40** (1984) , 109.
- [7] R. Guan , H. Hashimoto , K. H. Kuo , *Acta Cryst.* , **B40** (1984) , 560; **B41** (1985) ,219; **B43** (1987) ,343; **B46** (1990) ,103; *Solid State Phenomena* , **5**(1989) ,73.
- [8] Y. D. Yu , R. Guan , H. Hashimoto et al. , *Acta Cryst.* , **B51**(1995) ,149.
- [9] L. Wang , D. Feng , K. Tan et al. , *J. Mater. Sci.* , **24** (1989) , 1941.
- [10] R. Hillebrand , K. Scheerschmit , *Ultramicroscopy* , **27** (1989) , 375.
- [11] T. Epicier , M. G. Blanchin , P. Ferret et al. , *Phil. Mag. A* , **59**(1989) , 885.
- [12] T. Epicier , G. Thomas , H. Wohlfromm et al. , *J. Mater. Res.* , **6**(1991) , 133.
- [13] F. H. Li , D. Tang , *Acta Cryst.* , **A41**(1985) , 376.
- [14] D. Tang , C. M. Teng , J. Zou et al. , *Acta Cryst.* , **B42** (1986) , 340.
- [15] J. W. M. Jacobs , F. W. H. Kampers , J. M. G. Rikken et al. , *J. Electrochem. Soc.* , **136**(1989) ,2914.
- [16] W. Zhou , D. A. Jefferson , W. Y. Liang , *Supercond. Sci. Technol.* , **6**(1993) ,81.
- [17] Y. Ishida , *Electron Microscopy Techniques in Evaluation of Advanced Materials (in Japanese)* , Chouzou Bookshop , (1991) , 214.
- [18] P. Villars , L. D. Calvert , *Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases (2nd Edition)* , Vol. 3 , ASM International , The Materials Information Society , **3**(1992) , 2940.
- [19] C. E. Holley , R. N. R. Mulford , F. H. Ellinger et al. , *J. Phys. Chem.* , **51**(1955) , 1226.
- [20] R. Guan , R. S. Li , S. H. Xu et al. , *Surf. Sci.* , **326** (1995) , L467.
- [21] R. Guan , R. S. Li , S. H. Xu et al. , *Phys. Rev. B* , **529** (1995) , 4748.
- [22] 李日升、关若男,电子显微学报,17(1998),295.

托卡马克超声分子束加料*

姚良骅

(核工业西南物理研究院,成都 610041)

摘要 中国环流器新一号(托卡马克)装置采用新的等离子体加料方法——超声分子束注入。由于粒子注入深化,形成电子密度的峰化和密度极限提高。欧姆加热等离子体的能量约束时间的线性范围增长到 $\bar{n}_e = 4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 。实验结果表明,超声分子束注入是一种高效和有利改善约束的气体加料方法。

关键词 托卡马克,超声分子束,电子密度峰化,能量约束改善

SUPERSONIC MOLECULAR BEAM FUELING IN THE TOKAMAK

Yao Lianghua

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract A new fueling method——supersonic molecular beam injection(MBI) has been successfully performed in the HL - 1M tokamak during the period of the plasma current ramp up. Due to the deep penetration of the fueling particles, the electron density exhibits a peak and the value of the density limit increases. Confinement improvement is observed, with the upper end of the linear ohmic

* 国家自然科学基金、核工业科学基金资助项目
1998 - 06 - 10 收到初稿,1998 - 07 - 23 修回

confinement regime elongated to $\bar{n}_e = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. The experimental results imply that MBI is a high efficient gas fueling method for fusion plasma.

Key words tokamak, supersonic molecular beam, electron density peaking, improved energy confinement

1 引言

托卡马克是当前开发核聚变能最具竞争力的磁约束装置. 装置运行期间被约束的高温等离子体需要不断地补充燃料, 并要求尽可能将燃料送到等离子体的中心, 实现等离子体密度峰化. 现在普遍采用的表示等离子体聚变性能的 3 个主要参量之一——等离子体能量约束时间的改善与密度峰化密切相关^[1], 而密度峰化又取决于加料方法. 现有的主要加料方法为脉冲送气和冰弹丸注入. 常规送气加料存在的问题是气体粒子定向速度低, 发散角大, 只能沉积在等离子体边缘辐射区, 加料效率低, 难以形成密度峰化. 弹丸注入有可能进入等离子体中心, 但是若要维持中心峰化密度, 必须连续不断地注入高速弹丸, 其所需技术和设备相当复杂且运行费用昂贵. 本文介绍一种新的气体粒子加料手段——脉冲超声分子束注入, 其主要的优点是注入气体粒子定向速度高于声速, 且束流发散角小, 有利于粒子注入的深化和加料效率的提高. 作者曾在中国环流器一号 (HL - 1 装置) 及其改进型新一号 (HL - 1M 装置) 分别用氖分子束和氦、氢分子束先后做了加料实验^[2,3]. 在等离子体电流慢上升阶段注入脉冲超声分子束, 形成密度峰化, 并使等离子体能量约束得到明显的改善.

2 超声分子束流的形成

处于一定压强和温度 (P_0, T_0) 的气体经小孔 (Laval 喷嘴, 其喉部直径为 d) 喷射至真空区域. 达到平衡时, 真空本底气压和温度分别为 P_b 和 T_b . 在气体出口附近经扇形膨胀, 形成等熵区 (无激波寂静区)、前方的圆盘形马赫激波

区和周边的桶形激波区^[4], 如图 1 所示. 高压气体向出口处流动, 通道的横截面缩小并由压力差 ($P_0 - P_b$) 加速. 在出口小孔的喉部, 气流速度可以达到声速, 即气体粒子的平均速度等于当地声速, 称为马赫数 $M = 1$, 其条件是气体源气压 P_0 与真空室本底气压 P_b 之比超过一个临界值

$$G = \left[\frac{\gamma + 1}{2} \right]^{1/(\gamma - 1)}, < 2.1, \quad (1)$$

式中 γ 为气体定压比热与定容比热之比. 因为出口喉部处气压高于 P_b , 此处的气流处于扇形膨胀过程中, 随后进入所谓的寂静区, 是超声分子束研究中最感兴趣的区域. 该区域内, 马赫数 $M \gg 1$, 其长度 X_M 可用出口喉部直径 d 量度,

$$X_M/d \approx 0.67 \left(\frac{P_0}{P_b} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

这就意味着喷嘴直径越小, 压强比越大, 则超声区越长.

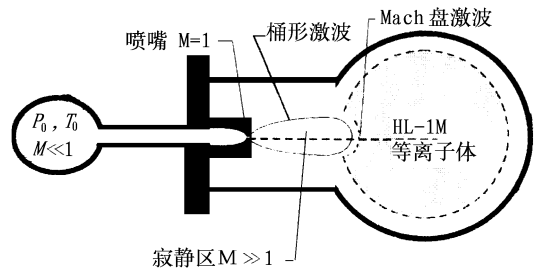


图 1 超声分子束流注入 HL - 1M 真空室示意图

设想在托卡马克 HL - 1M 装置上建立超声分子束流注入系统, P_0, P_b 以及 d 分别为: $P_0 = 3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, $P_b = 3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, $d = 0.01 \text{ cm}$. 代入 (2) 式得, 稳态分子束存在的空间长度为 $X_M = 23 \text{ cm}$ (氢在该气压下分子平均自由程 $\lambda = 90 \text{ cm}$). 分子束气源出口距离 HL - 1M 等离子体边缘为 35 cm . 因此, 稳态分子束流注入的前方将会出现激波. 如果是脉冲气体注入, 束流前方气压尚未积累到 $3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 已被等离子体电离和捕获. 这种加料还能降低对真空室

统抽速的要求. 曾对行程 1m 长, 出口孔径 $\phi = 1.5\text{mm}$ 的氢脉冲分子束作了平均飞行速度的测试, 得到 $v = 500\text{m/s}$, 再除以当地声速, 得马赫数 $M = 2^{[5]}$.

3 分子束注入等离子体深度的探讨

常规气体加料粒子注入速度仅为每秒几百米, 冰弹丸注入速度最高可达到每秒 2000 多米. 以下探讨加料粒子注入等离子体的深度与其注入速度之间的关系. 以氢原子为例, 在托卡马克等离子体温度范围 ($T_e = 100\text{eV} \sim 10\text{keV}$), 氢原子的电离率 $\nu_{i\text{ve}}$ 大致保持在 $10^{-8} \sim 10^{-7}\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ 范围内. 因而, 中性原子的初始穿透深度 $d = v_n / \nu_{i\text{ve}} n \leq 1\text{cm}$. 但实际上通过多道氢光谱测量和经过 Abel 变换得到的中性氢原子穿透等离子体要更深入些. 常规喷气加料氢注入 ($1/e$ 衰减) 深度可以达到 3—4cm, 冰弹丸注入则可到达高温等离子体中心. 这两种加料方式注入的深度都大于粒子定向运动所能达到的平均自由程, 但两者的机理有本质上的差别. 前者是由于氢分子受高能电子轰击的离解过程赋予每个 Franck - Condon 原子 3—4eV 动能, 中性氢原子与等离子体离子的碰撞以及逃逸的等离子体粒子在器壁和孔栏上“反弹”形成高能量中性粒子, 使中性氢原子进入等离子体的动能达到几个 eV 甚至更高^[6]. 冷冻的氢丸消融一个氢原子只需要极少能量, 大约 0.1eV. 弹丸之所以能够通过高温等离子体实现中心加料的主要因素是: 沿注入线受高温电子轰击的消融过程中, 在弹丸表面形成一层中性粒子和冷离子组成的保护层, 屏蔽了高温电子对冰弹丸的直接碰撞电离, 延长了弹丸寿命直至注入等离子体芯部. 当然, 冰弹丸的注入速度也很重要, 至少可以减少注入途中的消融损耗.

分子束的特性——定向速度提高, 速度分布和角分布变窄的特性, 有可能沿注入线形成一股高通量冷气体粒子束流通道, 使得后继注入的气体粒子减少受高温电子轰击电离的机

率, 得以更深入地注入等离子体. 实验结果表明, 通常在高通量强脉冲送气时容易出现的等离子体电流断裂的情况, 在分子束注入时很少发生, 且电子密度上升率 $d\bar{n}_e/dt$ 可以高至 (2—3) $\times 10^{20}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$, 相当于常规脉冲送气的 2—3 倍. 在 HL - 1M 装置上用多道光电二极管阵列测 He 587.2nm 和 H656.3nm 谱线强度分布并经 Abel 变换, 得到 He 和 H 原子注入 ($1/e$ 衰减) 深度达到 10cm 以上, 远高于常规脉冲送气. 分子束注入加料相当于低速弹丸 (200m/s, 例如 ASDEX 装置^[7]) 或小体积弹丸 ($\phi < 1\text{mm}$, HL - 1M 装置) 注入等离子体的效果.

4 分子束注入对电子密度分布峰化的影响

在 HL - 1M 装置上使用氢分子束注入氢等离子体, 平均电子密度上升率最高可达到 $\frac{d\bar{n}_e}{dt} = 2.9 \times 10^{20}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ (弹丸注入 $\frac{d\bar{n}_e}{dt} = 1.07 \times 10^{22}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$), 当等离子体电流慢上升过程中注入分子束, 在 200—250ms 内电流上升至 150—200kA, 平均电子密度最高可达到 $\bar{n}_e = 8 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$, 已接近密度极限^[8]. 通常, 密度峰化因子 $Q_n = 1.45 \sim 1.55$, Q_n 的极大值超过 1.65. 常规脉冲送气加料达到的最高密度为 $\bar{n}_e = 6.2 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$, Q_n 值通常低于 1.4, 保持在 1.35 左右.

HL - 1M 装置等离子体电子密度峰化往往伴随着等离子体柱边缘收缩, 密度剖面半宽度变窄, 而体平均密度不一定是最大值. 陡峭的密度分布与陡峭的电子温度、离子温度分布一样, 均为约束改善模式的一种表现形式.

5 分子束注入改善等离子体能量约束

在 HL - 1M 装置纯欧姆放电中, 采用脉冲氢分子束注入氢等离子体, 使能量约束时间 τ_E 较常规喷气加料提高 30%^[9]. 采用常规脉冲送气, 在低密度安全因子 $q_{95} = 3.9 \sim 5.5$, 在等离

子体电流慢上升期间注入气体,考察 E 随平均电子密度的变化. 实验范围内 E 几乎随密度线性增长. 当 $\bar{n}_e \geq 2.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 时, E 随 \bar{n}_e 增长减缓并达到饱和. 若使用氢作为工作气体,进行纯欧姆放电的等离子体环向电流和环向磁场分别为: $I_p = 150 - 200 \text{kA}$, $B_t = 2.4 - 2.5 \text{T}$, 发现 E 值和达到饱和的临界密度范围均大为增加. 当 $\bar{n}_e \geq 4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 时, 脉冲送气加料方法 E 值达到饱和, 但改用分子束加料时, E 值随 \bar{n}_e 增长仍在缓慢上升, 在 $\bar{n}_e = (4 - 8) \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 范围内, 分子束加料比常规脉冲送气高 10% — 20%. 图 2 显示两种加料方法的 E 值随 \bar{n}_e 增长的变化规律.

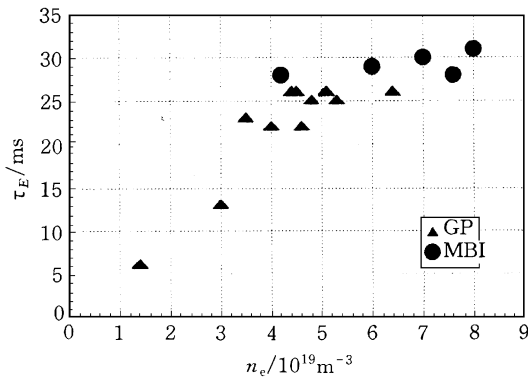


图 2 两种加料方法 E 随 \bar{n}_e 增长的变化规律
(GP——常规喷气加料; MBI——分子束注入加料)

6 结论和讨论

以上几个方面的实验结果可归纳如下:

(1) 本文介绍一种新的气体粒子加料手段

——超声分子束注入, 等离子体密度在注气过程中急剧上升, 密度上升率为常规喷气加料的 2—3 倍, 且不出现破裂现象. 气体粒子深入等离子体 8—10cm 以上. 伴随着粒子注入深化, 密度峰因子 Q_n 可达 1.65. 能量约束时间增加 10%—30%.

(2) 超声分子束注入所需设备和条件虽比常规喷气加料稍微复杂些, 但较冷冻气体制作弹丸要简单得多. 因此, 有可能替换常规喷气成为高效的和有利改善约束的核聚变等离子体气体加料手段.

参 考 文 献

- [1] R. D. Stambaugh, S. M. Wolfe, R. J. Hawryluk et al., *Phys. Fluids B*, **2**(1990), 2941.
- [2] 姚良骅等, HL-1 装置分子束注入实验研究, 中国核科技报告, CHIC-00783.
- [3] Yao Lianghua, Liu Yi, Liu Dequan et al., *Europhysics Conference Abstracts*, European Physical Society, Geneva, **21A**(), (1998), 637.
- [4] G. Scoles, *Atomic and Molecular Beam Methods*, Oxford University Press, New York, **1**(1988), 15.
- [5] L. H. Yao, N. Y. Tang, X. Y. Feng, *核聚变与等离子体物理*, **17**(1997), 61.
- [6] 爱德华·泰勒, *聚变*, 原子能出版社, **1**(上册)(1987), 121.
- [7] M. Kaufmann, K. Buchl, G. Fussmann et al., *Nucl. Fusion*, **28**(1988), 827.
- [8] 邓中朝、周艳、刘泽田等, *核聚变与等离子体物理*, **18**(增刊)(1998), 27.
- [9] Yao Lianghua, Tang Nianyi, Cui Zhengying et al., *Nucl. Fusion*, **38**(1998), 631.