

中国环流器二号 A(HL-2A)超声分子束 注入最新结果*

姚良骅[†] 冯北滨 陈程远 冯 震 李 伟 焦一鸣

(核工业西南物理研究院,成都 610041)

(2007 年 7 月 19 日收到,2007 年 9 月 24 日收到修改稿)

HL-2A 装置电子回旋共振加热时,氘脉冲超声分子束穿越分界面,等离子体各项重要参数,包括等离子体储能、极向比压、中平面线平均密度、中心密度和温度上升,中子产额急剧增加.超声分子束注入有可能较常规脉冲送气在台基顶部提供较强的粒子源,被认为是可供 ITER 替换脉冲送气的加料方法之一. HL-2A 装置氘超声分子束注入的平均速度约为 1.7 km,与溢流(分子流)注入真空的速度测量作了比较.

关键词:超声分子束注入,托卡马克,飞行时间法,加料

PACC:3640,5240K,5255G,7430C

1. 引 言

自 1992 年超声分子束注入在中国环流器一号(HL-1)装置上成功开发以来^[1],作为核聚变装置加料技术近年来在国内外有较大的发展,先后应用于中国环流器新一号(HL-1M)^[2-5]、超导托卡马克 HT-7^[6]、法国超导托卡马克 Tore Supra^[7]、德国仿星器 W7-AS^[8]和带偏滤器托卡马克 ASDEX-Upgrad^[9]. 在 HL-2A 装置上已将超声分子束注入系统作了改进,分子束阀门全开所需时间降低至 0.2—0.3 ms,并用低温气体通过拉瓦尔喷口形成团簇束注入等离子体,大大地提高了注入深度和加料效率^[10,11]. 目前在中国环流器装置上使用的超声分子束阀门是电磁力驱动的,其特点是阀门动作快,短的气体脉冲有利于形成较为理想的绝热膨胀物理过程,产生超声分子束或团簇束. 本文介绍 HL-2A 装置超声分子束注入的基本特性和最新结果.

2. 聚变装置各种加料阀门结构和性能比较

聚变装置加料主要使用电磁阀门、气动阀门和

压电晶体阀门三种,它们的结构和性能比较如下:

1) 高压气体通过拉瓦尔喷嘴进入真空形成超声分子束的基本原理在文献[4]中已经做过详细描述. 本文在此基础上进一步阐明实现超声分子束的关键部件电磁阀门的结构并与相关的其他阀门的性能作一比较. 通常,在激光化学或化学反应动力学领域中使用的超声分子束也都使用电磁阀,该电磁阀结构如图 1 所示. 这种阀门的优点是阀门的出口直径小,开启时间短,气流沿中心轴线喷出无阻拦,流量较大,可以用于高压(6 MPa),也适合作短脉冲调制运行. 中国环流器系列托卡马克装置(HL-1M, HL-2A)超声分子束注入均使用电磁阀. 当然,在使用这种阀门时也出现一些困难,主要的困难是不能承受强磁场干扰,在弱磁场区域工作时需要在阀门外加铁磁屏蔽层.

2) 针对电磁阀的缺点,法国卡达拉其可控聚变研究所开发了一种气动式脉冲超声分子束阀门不受磁场干扰. 其工作原理很巧妙,将加料气体兼作推进气体驱动阀门活塞之用,如图 2 所示. 阀门启动前,活塞位于阀门底部,输气管道充气至几个气压. 通过电容器放电先后给出两个脉冲电流分别供给上下两个线圈,第一个脉冲电流供电上线圈,将铁块上提,使进气管内气压升高,推活塞向上冲,撞击滑动

* 国家自然科学基金(批准号:10475024,10675043)资助的课题.

[†] E-mail: yaolh@swip.ac.cn

阀芯, 阀门被打开, 同时高压气体经 Laval 喷嘴进入真空. 第二个脉冲电流供电下线圈, 将铁块向下拉, 高压气体从返回气管进入迫使活塞下降并复位, 完成一个分子束脉冲的注入. 活塞的推进速度在忽略活塞与管壁摩擦力、传热和黏滞损失之后, 与推进气体的声速成正比

$$u(t) \propto \frac{2C_0}{\gamma - 1}, \quad (1)$$

式中, C_0 为推进气体的声速, $C_0 \propto \sqrt{T/m}$ (T 为推进气体的开尔文温度, m 为气体质量), γ 为推进气体的比热比. 由 (1) 式可见, 加料 (推进) 气体的质量越低、温度越高, 则活塞能量越大, 阀门开启越快. 目前, 这种阀门只能运行在低气压 ($< 1 \text{ MPa}$).

3) 为了与超声分子束注入作一个对比, 本文介绍核聚变实验装置常规加料广泛采用的脉冲送气 (加料) 所使用的压电晶体阀门结构, 如图 3 所示. 这种阀门的工作原理与电磁阀有很大的差别, 它是利用贴附在阀门密封面上的电致伸缩晶体材料加电压时使密封面形变, 于是阀体内气体从形变产生的缝隙漏进真空室. 阀门的密封面整体仍处于原先的位置, 如果气体分子通过缝隙时没有发生碰撞, 保持其原有的空间和速度分布, 这种气流在物理上定义

为泻流或溢流 (effusion)^[12]. 气流的最高速度可达到声速. 这种阀门的优点是不受电磁场的干扰, 可以用作稳态送气, 也可以脉冲送气. 其主要缺点是不具备注入粒子定向和匀速的特征, 注入深度浅, 加料效率低, 进气量小, 不适用于大型装置如 ITER.

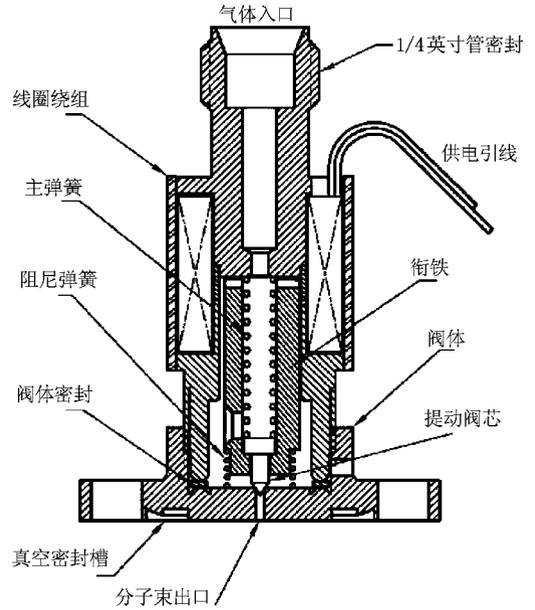


图 1 电磁式超声分子束阀门结构图

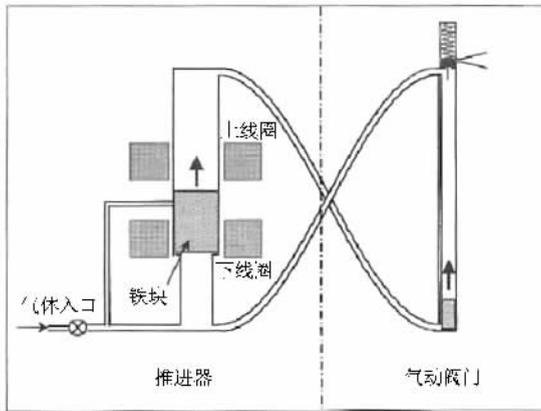


图 2 气动式脉冲超声分子束阀门结构图

3. 氢超声分子束注入 HL-2A 真空室速度测量

HL-2A 装置是一个具有封闭式偏滤器的托卡马

克^[10], 目前运行于下偏滤器, 其主要参数如下: 大环半径 $R = 1.65 \text{ m}$, 等离子体半径 $a = 0.45 \text{ m}$, 环向场 $B_t = 2.65 \text{ T}$, 等离子体存在时间达到 3 s , 平顶时间超过 1800 ms , 平均电子密度为 $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 等离子体电流 $I_p = 0.4 \text{ MA}$. 纯欧姆加热时的电子温度大

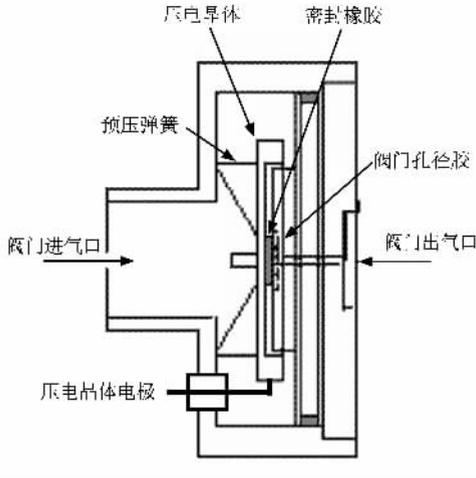


图 3 压电晶体阀门结构图

约为 1 keV。真空室内覆盖有碳纤维复合 (CFC) 材料用于保护装置内一些面向等离子体轰击的部件。实验中,采用“硅化”进行常规壁处理以获得更干净的等离子体。

图 4 为用飞行时间法测量氢超声分子束在 HL-2A 真空室注入线上的平均速度的示意图,分子束阀门喷口至 HL-2A 等离子体边缘距离为 1300 mm。HL-2A 真空室注入段在托卡马克放电期间真空度好于 1×10^{-4} Pa,氢分子的平均自由程大于 100 m。因此,注入过程中氢超声分子束的前锋在遇到等离子体之前未遇阻挡,不会出现激波,这就保证了用飞行时间法测量氢超声分子束速度的可行性。第 5315 炮分子束阀门背压为 1.2 MPa,分子束脉冲宽度为 0.4 ms。速度测量的过程如下:程序控制器同时向分子束阀门和 CCD 相机各发出一个 TTL 触发信号,阀门经过 0.25 ms 左右的死时间 (dead time) 才打开并发出分子束,经过 1300 mm 飞行距离进入 HL-2A 等离子体,CCD 相机接触到触发信号后延迟 1 ms 时间再打开快门接受来自等离子体的 H_{α} 光辐射。为了与本底等离子体形成足够的反差,曝光时间约需 0.02 ms。

超声分子束飞行速度 = 飞行距离 / 飞行时间,分子束飞行时间等于 CCD 相机延迟时间 - 阀门死时间 + 相机曝光时间,即 $v = 1300 \text{ mm} / (1 - 0.25 + 0.02) \text{ ms} \approx 1700 \text{ m/s}$ 。应当指出,虽然在飞行途中超声分子束没有遇到障碍,但是,在阀门出口处超声分子束形成过程中速度变化很大,所以用这种测量方法只能得到速度的平均值。图 5 显示超声分子束脉冲与等离子体相互作用产生的 H_{α} 光辐射积分时间

为 20 μs 的等强度线图。受照像机镜头视角倾斜的影响, H_{α} 光辐射等强度线图画面呈非圆对称分布。该图的一个重要特点是,大面积的中心区域光强梯度变化非常之小,几乎是接近均匀的,而边缘的光强梯度却很大。这反映出超声分子束流的中心部分粒子定向、匀速、高流强的特点;外围部分粒子速度包含较多的热运动成分,流强沿横向逐渐衰减的特征。

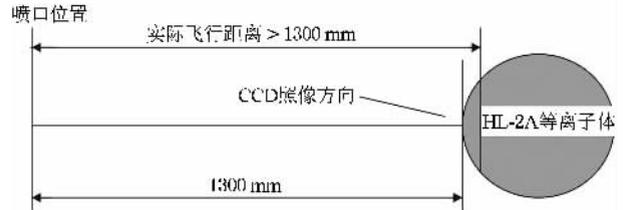
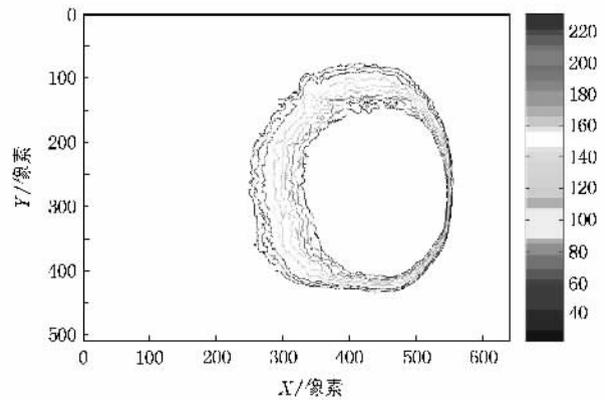


图 4 HL-2A 真空室氢超声分子束注入线上平均速度测量布局的示意图

图 5 第 5315 炮超声分子束与 HL-2A 等离子体相互作用 H_{α} 光辐射等强度线图 (CCD 相机参数:相机快门延迟时间 1 ms,曝光时间 0.02 ms。超声分子束发散角约为 5°)

氢分子在室温 (293 K) 时的声速为 $\left(\frac{\gamma kT}{m}\right)^{1/2} = 1300 \text{ m/s}$,平均速率为 $\left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2} = 1750 \text{ m/s}$,方均根速率 $\left(\frac{3kT}{m}\right)^{1/2} = 1900 \text{ m/s}$,式中 γ 为定压热容量与定容热容量之比,对于双原子分子 $\gamma = 1.4$, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温标,室温 $T = 293 \text{ K}$ 。本实验中测到的氢超声分子束 1.3 m 距离平均飞行速度相当于室温时氢分子热运动的平均速率,比方均根速率还低 200 m/s。在室温温度条件下,理论上氢超声分子束的极限速度约为 $v_l = [2\gamma kT(\gamma - 1)m]^{1/2} = 2910 \text{ m/s}$ ^[4]。本实验测到的平均速度仅及极限速度的 60%。这至少说明两点:1) 本实验所用分子束阀

门(美国 Parker 公司 S99 阀门)的拉瓦尔喷口形状的设计还不够理想,分子的热运动能量和内能没有全部转换为平动能,市场上购买的分子束阀门性能差异是比较大的。(2)实验测到的只是平均速度,比束流的最高(极限)速度要低一些。但是,这是氢超声分子束注入 HL-2A 等离子体前的实际速度,是有意义的。我们只知道氢气体源的温度和声速,不知道超声分子束注入途中的气体温度,也就无法得到当地声速和马赫数。

4. 溢流(分子流)注入真空的速度测量

日本国立聚变科学研究所宫泽顺一用电容压力计测量压电晶体阀门送氢气流的速度^[13],在直径 0.344 m,长 3.85 m 的真空管道的一端用压电晶体阀门喷氢气,在管道的另一端测量气流到达时间。溢流气体脉冲传播示意图由图 6 所示。实验时阀门的背压范围为 0.16 至 0.40 MPa,氢气流脉冲宽度为 20 ms。实验测到的氢气流的速度相当于声速,阀门的背压高低对速度影响不大,且与阀门出口是否对准真空管道的轴线或垂直于轴线方向无关。这个实验证明,通过压电晶体阀门输出的气体脉冲可以达到声速,符合溢流的定义。

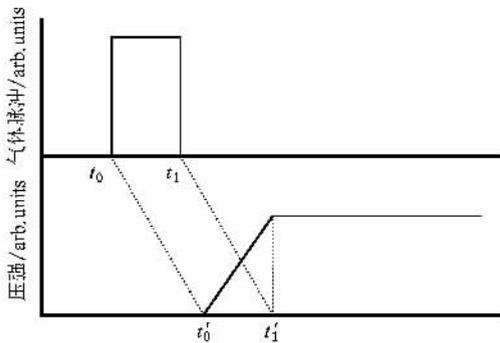


图 6 气体脉冲传播示意图

5. 脉冲超声分子束穿越 HL-2A 等离子体分界面

超声分子束注入 HL-2A 装置真空室的布置如文献 10 图 1 所示。束流沿中平面径向由弱场侧向等离子体垂直注入。用于产生超声分子束的拉瓦尔(Laval)喷口直径 $d = 0.2$ mm,阀门喷口至等离子体边缘的距离约为 1.30 m。在阀门周围缠绕多层、总

厚度为 5 mm 的软铁用于屏蔽 HL-2A 装置的杂散磁场。氢源工作气压范围为 0.2 MPa 至 3 MPa。分子束加料系统采用脉冲工作方式,阀门响应时间约为 0.25 ms,脉宽和脉冲间隔均可调,能产生实验中所需的各种系列脉冲。

利用快速扫描气动电探针^[14]测量 HL-2A 分界面里外等离子体的温度和密度,该快速扫描探针可以在一次放电中测量到边缘和删削层(SOL)8 cm 范围内的等离子体参数径向分布。探针插入等离子体的石墨保护套直径为 26 mm,探针平均运动速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,用数字光栅位移系统提供探针空间位置,分辨率高达 0.04 mm。因为分界面以内等离子体的温度和密度比分界面以外有明显的增加,如果冷脉冲分子束注入能够穿越分界面,则分界面内的温度和密度就会随脉冲分子束注入而受到调制。实验证实了这个设想。第 5233 炮超声分子束脉冲串的参数为:阀门的背压 1.45 MPa,脉冲个数 10 个,脉冲间隔 40 ms,单数脉冲宽度为 2 ms,双数脉冲宽度为 1 ms。图 7 显示 10 个超声分子束脉冲注入期间快速扫描探针从分界面内中平面 $r = 34$ cm 快速向外运动过程中测到的等离子体电子温度和密度随径向位置的变化, r 为探针所在的径向位置, H_α 为主等离子体边缘 H_α 辐射光强度,同时标记超声分子束脉冲注入的时刻。从图上可以清晰的看到,在分界面($r = 38$ cm)以内的闭合磁面约束区,超声分子束脉冲注入期间等离子体的密度明显增高。这样就为获得高的台基密度提供了可行性,有利于实现 H 模运行。随着探针向外移动, $r > 38$ cm,分界面外区域(删削层)等离子体的温度和密度比较低,脉冲超声分子束加料对于删削层等离子体的影响(作用)比分界面内小得多,这就足以证明超声分子束注入加料确实穿透了分界面。

6. ECRH 期间脉冲超声分子束注入加料效果

在 H 模(高约束运行模式)发现以前^[15],等离子体能量约束时间随着辅助加热功率增加会明显下降。HL-2A 装置电子回旋共振加热(ECRH)期间用常规脉冲送气加料,随着加热功率增加也出现了约束下降的现象。脉冲超声分子束注入加料有可能改变这种不利态势,在 ECRH 期间,保持等离子体中心密度和温度继续上升。第 5915 炮氘等离子体放电。

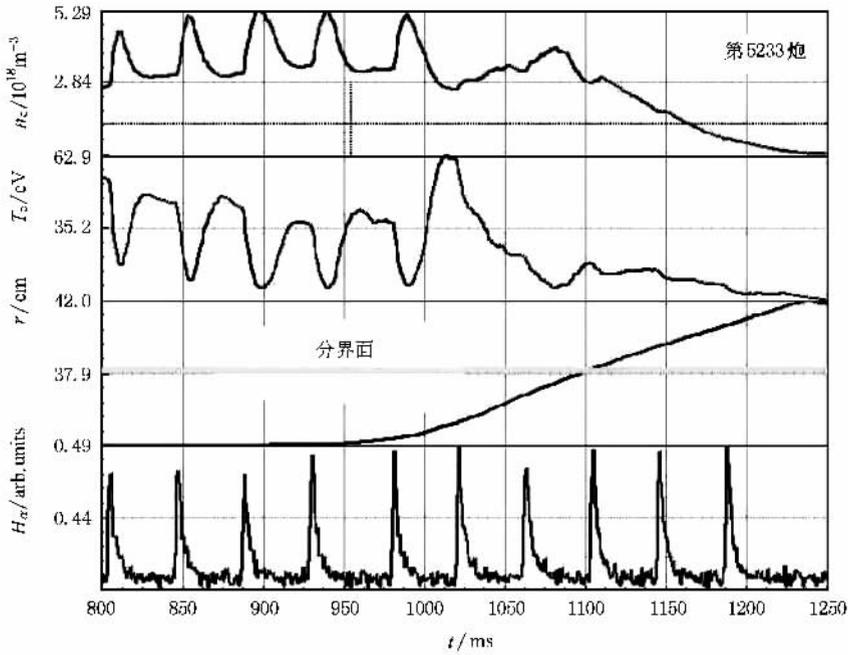


图 7 超声分子束脉冲注入期间快速扫描探针测量分界面里外等离子体的温度和密度

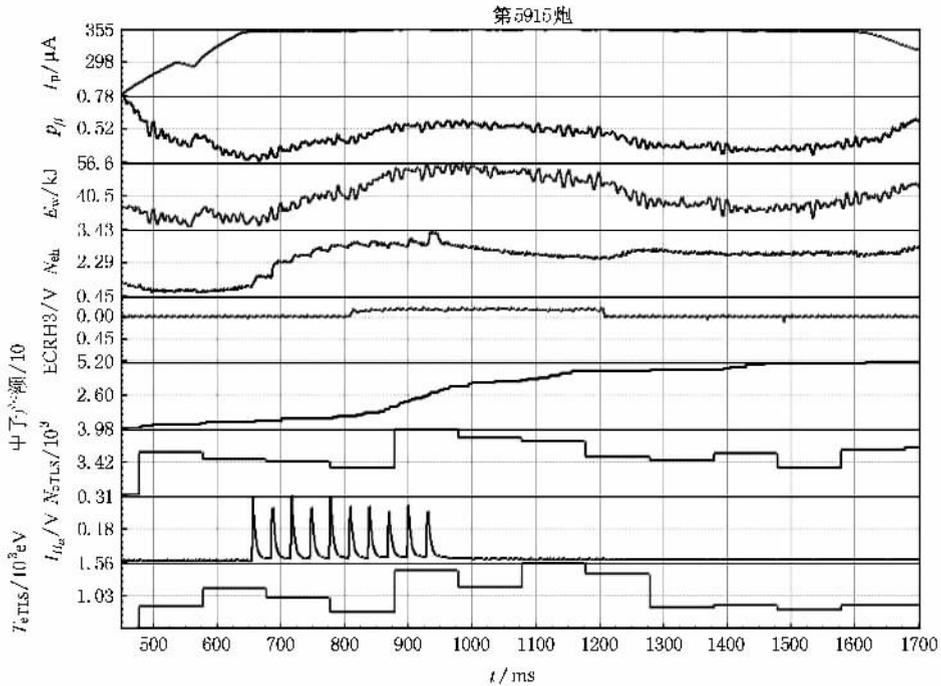


图 8 ECRH 期间脉冲超声分子束注入加料效果

在等离子体电流达到平顶, $I_p = 366$ kA, 从 $t = 650$ ms 开始注入气超声分子束脉冲 10 个, 工作气压为 2.0 MPa, 脉宽 0.3 ms, 间隔时间 30 ms. ECRH 从 $t = 800$ ms 至 1200 ms, 功率为 1 MW. 汤姆逊激光散射是每 100 ms 采样一次, 采样时间几十 ns. 超声分子束注

入前, 等离子体密度约为 $1.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 中子产额累计不高, 不到 10 个, 表明这炮放电质量较好, 高能逃逸电子数量较少, 因此轰击器壁产生的光致核反应的中子产额低. 随着脉冲超声分子束注入, 等离子体密度持续升高, 线平均密度逐渐升高至 $3.43 \times$

10^{19} m^{-3} 逃逸电子的能量得到抑制,光致核反应的中子产额应该大大降低. 后 5 个超声分子束脉冲注入时 ECRH 辅助加热投入,所有的等离子体主要参数,包括等离子体储能(W_E),极向比压(β_p),中平面平均密度(n_{eH}),汤姆逊激光散射密度(n_{e-TLS})和温度(T_{e-TLS})都持续增长. 中子产额急剧增长,这段时间的中子产额约为 40 个. 在超声分子束注入结束后,此时 ECRH 辅助加热仍在进行,但等离子体平均密度和中心密度、离子体储能、极向比压均逐渐下降,中子产额也随即减少. 因为氘-氘核聚变的中子产额正比于氘核的密度平方和反应截面,而后者随离子温度指数增长. 波加热和超声分子束注入期间是整个放电密度达到最大、温度最高,光致核反应的中子产额为最小,此时高额的中子产额可能主要来自氘-氘聚变反应的产物. 聚变中子产额用中子通量监测器^[16]测量,该监测器由两只裂变室探测器组合构成,其中一只高灵敏度的裂变室探测器,其阴极上涂有高纯裂变材料 ^{235}U ,另一只未涂裂变材料,称为‘空白’探测器. 此组合用于中子、 γ 射线、硬 X 射线的混合辐射场条件下,可完全扣除后两种辐射对中子通量测量的影响,提高了测量精确度.

7. 结论和讨论

ITER(国际热核聚变实验堆)物理基础进展一文认为:在 H 模运行状态,分界面密度与台基密度紧密耦合,后者构成 H 模线平均密度的大部分. 如果 ITER 装置使用标准脉冲送气,由于分界面密度与台基密度的耦合,可能达不到足够高的台基密度. 因此,ITER 专家组认为:超声分子束注入有可能较常规脉冲送气在台基顶部提供较强的粒子源,是 ITER 可供替换的加料方法之一^[17]. 本文提供的 HL-2A 偏滤器实验是一个很好的例证:在 ECRH 期间超声分子束注入可以穿过分界面,使台基密度和线平均密度上升同时,等离子体温度得到升高,所有的等离子体主要参数都持续增长. 实验表明,超声分子束注入使有辅助加热的 HL-2A 等离子体在达到 H 模式运行之前进入了一个好的约束状态.

应该清新地看到,目前我们使用的电磁阀和气动阀供给 ITER 使用都还不是理想的. 为此,我们正与法国同行研制一种新的、可用于强场侧的超声分子束阀门供 ITER 使用.

- [1] Yao L H, Diao G Y, Wang Z H, Deng H C, Luo J L, Duan X R, Cui Z Y, Guo G C, Gong D F, Zheng Y Z, Wang E Y 1993 *Proc. 20th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys.* (Lisboa, Portugal, 1993) **17C(I)** 303
- [2] Yao L H, Tang N Y, Cui Z Y, Xu D M, Deng Z C, Ding X T, Luo J L, Dong J F, Guo G C, Yang S K, Cui C H, Xiao Z G, Liu D Q, Chen X P, Yan L W, Yan D H, Wang E Y, Deng X W 1998 *Nucl. Fusion* **38** 631
- [3] Yao L H, Zhou Y, Cao J Y, Feng B B, Feng Z, Luo J L, Dong J F, Yan L W, Hong W Y, Li K H, Cui Z Y, Liu Y, Wang E Y, Yan J C, HL-1M team 2001 *Nucl. Fusion* **41** 817
- [4] Yao L H, Feng B B, Feng Z, Dong J F, Li W Z, Xu D M, Hong W Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 596 (in Chinese)[姚良骅、冯北滨、冯震、董贾福、郦文忠、徐德明、洪文玉 2002 物理学报 **51** 596]
- [5] Yao L H, Dong J F, Zhou Y, Feng B B, Cao J Y, Li W, Feng Z, Zhang J Q, Hong W Y, Cui Z Y, Wang E Y, Liu Y 2004 *Nucl. Fusion* **44** 420
- [6] Gao X, Jie Y X, Yang Y, Xia C Y, Wei M S, Zhang S Y, Cheng Y F, Hu L Q, Mao J S, Tong X D, Wan B N, Kuang G L, Li J G, Zhao Y P, Luo J R, Qiu N, Yang K, Li G, Xie J K, Wan Y X 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2933
- [7] Bucalossi J, Dejarnac R, Martin G, P gouri B, Tsitrone E, Geraud A, Ghendrih P, Gil C, Grisolia C, Guirlet R, Gunn J, Loarer T, Tore Supra team 2002 19th IAEA Fusion Energy Conf. (Lyon, France, 2002) CD-ROM file EX/P4-04
- [8] Yao L H, Baldzhun J 2003 *Plasma Sci. Technol.* **5** 1933
- [9] Lang P T, Neuhauser J, Bucalossi J, Chanin A, Coster D P, Drube R, Dux R, Haas G, Horton L D, Kalvin S, Kocsis G, Maraschek M, Mertens V, Rohde V, Rozhansky V, Schneider R, Senichenkov I, Veselova I, Wolfrum E, ASDEX Upgrade Team 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** 1495
- [10] Yao L H, Yuan B S, Feng B B, Cheng C Y, Hong W Y, Li Y L 2007 *Chin. Phys.* **16** 200
- [11] Shi Z B, Yao L H, Ding X T, Duan X R, Feng B B, Liu Z T, Xiao W W, Sun H J, Li X, Li W, Chen C Y, Jiao Y M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4771 (in Chinese)[石中兵、姚良骅、丁玄同、段旭如、冯北滨、刘泽田、肖维文、孙红娟、李旭、李伟、陈程远、焦一鸣 2007 物理学报 **56** 4771]
- [12] Valyi L 1977 *Atom and Ion Sources* (John Wiley & Sons, London) p. 84
- [13] Miyazawa J, Yamada H and Matsuoka M 2003 *Gas Flow Velocity of the Direct Gas Puff*, Research report, Toki, Japan: NIFS-MEMO-41 4

- [14] Hong W Y , Yan L W , Cong S M , Qian J 2005 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **25** 241 (in Chinese) [洪文玉、严龙文、丛恕敏、钱俊 2005 核聚变与等离子体物理 **25** 241]
- [15] ASDEX Team 1989 *Nucl. Fusion* **29** 1959
- [16] Yang J W , Song X Y , Li X , Zhang W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1648 (in Chinese) [杨进蔚、宋先瑛、李旭、张炜 2005 物理学报 **54** 1648]
- [17] Loarte A , Lipschultz B , Kukushkin A S , Matthews G F , Stangeby P C , Asakura N A , Counsell G F , Federici G , Kallenbach A , Krieger K , Mahdavi A , Philipps V , Reiter D , Roth J , Strachan J , Whyte D , Doerner R , Eich T , Fundamenski W , Herrmann A , Fenstermacher M , Ghendrih P , Groth M , Kirschner A , Konoshima S , LaBombard B , Lang P , Leonard A W , Monier-Garbet P , Neu R , Pacher H , Pegourie B , Pitts R A , Tkamura S , Terry J , Tsitron E , the ITPA Scrape-off Layer and Divertor Physics Topical Group 2007 *Nucl. Fusion* **47** S203

Recent results of SMBI on the HL-2A tokamak with divertor configuration *

Yao Liang-Hua[†] Feng Bei-Bin Chen Cheng-Yuan Feng Zhen Li Wei Jiao Yi-Ming

(*Southwestern Institute of Physics , Chengdu 610041 , China*)

(Received 19 July 2007 ; revised manuscript received 24 September 2007)

Abstract

Supersonic molecular beam injection (SMBI) can penetrate the separatrix of the HL-2A plasma and result in the increase of important plasma parameters , such as the plasma storage energy , the β_p , the line averaged electron density , the central electron density and temperature. During deuterium plasma ECRH and deuterium SMBI , the neutron account rapidly increases along with the electron density and temperature increments. SMBI was considered as an alternate fuelling technique , which may provide a higher particle source at the pedestal top for ITER.

A mean velocity for hydrogen SMBI of about 1.7 km/s was detected in HL-2A torus and the measured result was compared with that for the effusion in vacuum.

Keywords : supersonic molecular beam injection , tokamak , fly time method , fuelling

PACC : 3640 , 5240K , 5255G , 7430C

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10475024 , 10675043).

[†] E-mail : yaolh@swip.ac.cn