

强场和弱场侧超声分子束注入对加料的影响^{*}

焦一鸣[†] 姚良骅 冯北滨 陈程远 周 艳 石中兵 董家齐 段旭如

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

(2009 年 11 月 8 日收到; 2009 年 12 月 11 日收到修改稿)

报道了 HL-2A 装置最新的实验结果, 讨论并研究了超声分子束的注入位置对分子束在等离子体中的消融和穿透的影响, 其中包括电离后的分子束粒子在磁场梯度作用和 $E \times B$ 漂移下的加速或减速及由此形成的冷通道效应. 研究表明, 磁场梯度和 $E \times B$ 漂移对于超声分子束的加料效果、消融和穿透有着重要的作用. 强场侧注入可使电离后的电子和离子更深地进入等离子体芯部. 这些研究对于更好地理解超声分子束与等离子体的相互作用和优化设计加料系统有一定作用.

关键词: 超声分子束加料实验, Tokamak 等离子体, 注入位置, 消融和穿透

PACC: 5240, 5255G, 3640

1. 引 言

热核等离子体聚变研究中燃料的注入方式和效率是国际热核聚变实验反应堆 (ITER) 研究的热点之一. 超声分子束注入技术是一种由中国环流器新一号 (HL-1M) 运行小组探索出的一种新的加料方式^[1,2]. 在 HL-1M 取得实验结果后, 该方法还先后在中国环流器二号 A (HL-2A)^[3-5], HT-7^[6], 法国超导 Tokamak Tore Supra^[7], 德国仿星器 W7-AS^[8] 和带偏滤器 Tokamak ASDEX Upgrade^[9] 得到验证和应用.

超声分子束采用了 Laval 喷嘴, 可以使喷射出的高压气体形成超声分子束流, 从而能够穿透到较深的等离子体区域. 该技术已被 ITER 列为候选的送料方式之一. 尽管超声分子束注入技术已在现役的聚变装置上取得了令人振奋的结果, 但是很多相关的原理性和工程方面的研究还需要深入地开展下去, 特别是物理学家最关心的粒子的注入深度和加料效率问题.

超声分子束注入深度和加料效率包括两个部分, 一部分是中性的超声分子束或团簇束以速度 v_b 通过 Laval 喷口注入等离子体, 沿路逐渐消融至某一深度 (这一部分在文献 [10] 中有比较深入的研

究). 本文中主要研究第二部分, 即电离后的电子和离子如何能够更深地进入等离子体芯部, 从而引出了分子束加料口位置 (强场侧和弱场侧) 对注入深度的影响的问题.

2. 超声分子束注入系统

最近对 HL-2A 装置上超声分子束注入系统进行改进和完善^[11]. 除了常规的弱场侧注入口外, 还增加了强场侧的注入口. 图 1 是该系统的结构示意图. 两种不同类型的分子束注入系统被分别安装在大环的同一截面的内外两侧. 外侧 (弱场侧) 是电磁阀门, 内侧 (强场侧) 则是气动阀门. 图 1(a) 是外侧的电磁阀门系统, 图 1(b) 是内侧的气动阀门系统.

弱场侧超声分子束注入系统 Laval 喷嘴直径 $d = 0.2 \text{ mm}$, 分子束阀门喷口至等离子体边缘的距离约为 1.30 m . 分子束阀门完全开启时间可以降为 $0.2\text{--}0.3 \text{ ms}$. 送料源为氖气, 工作气压为 $0.3\text{--}3 \text{ MPa}$. 采用脉冲调制方式送气, 脉冲宽度可以调节, 分子束脉冲宽度最小可达 0.3 ms . 为了屏蔽装置放电中的杂散场对电磁阀门的影响, 厚度为 5 mm 的软铁将阀门包裹其中. 强场侧的 Laval 喷口直径 $d = 2 \text{ mm}$, 安装在主真空室内侧, 正对弱场侧的分子束

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10675043, 10975049) 资助的课题.

[†] E-mail: jiaoym@swip.ac.cn

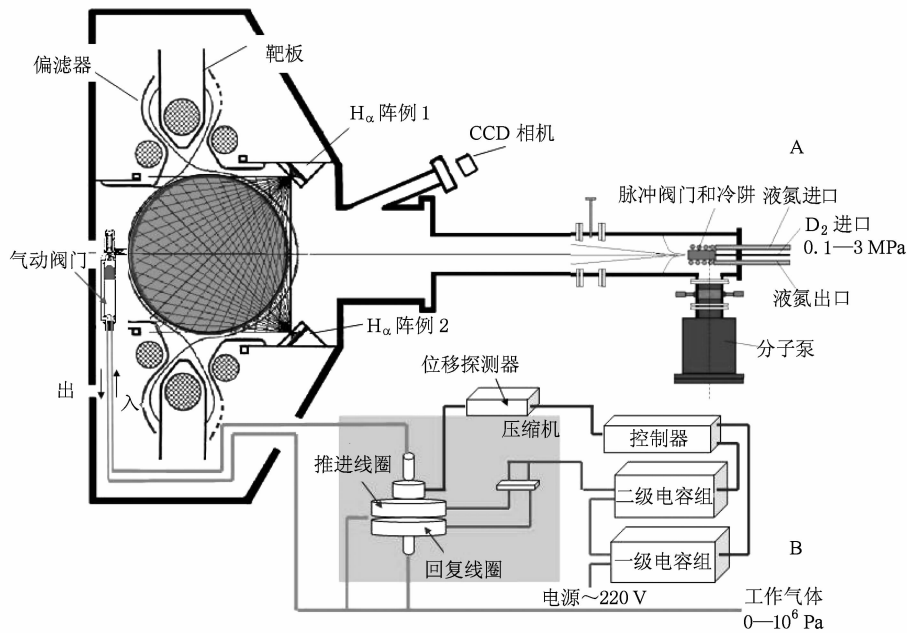


图1 分子束注入系统结构示意图 A区是外侧的电磁阀门系统,B区是内侧的气动阀门系统

喷口.

3. 装置实验参数和诊断条件

HL-2A 是一个封闭型偏滤器位形的 Tokamak 装置^[12],其几何尺寸为大半径 $R = 1.65 \text{ m}$,小半径 $a = 0.40 \text{ m}$. 等离子体放电参数如下:等离子体电流 $I_p = 0.2\text{--}0.4 \text{ MA}$,环向磁场 $B_t = 2.0\text{--}2.8 \text{ T}$,等离子体放电时间为 $1\text{--}3 \text{ s}$,线平均电子密度 $\bar{n}_e = 1.0 \times 10^{19}\text{--}6.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,Ohm 加热时的电子温度为 1 keV 以上.

30 多项诊断设备已在 HL-2A 上建立,能够测量多种等离子体物理参量的空间分布和随时间的变化. 在超声分子束实验中主要用到了以下一些诊断:远红外激光干涉仪用来测量等离子体线平均电子密度和密度空间分布^[13], 2 mm 微波扫频外差接收机测量等离子体的电子温度分布^[14],该系统利用软 X 能谱测量的电子温度进行绝对标定^[15],切向 $H\alpha$ 光阵列测量分子束注入期间中性粒子源的分布^[16]和沉积位置.

4. 弱场与强场注入的加料比较

实验中利用弱场侧和强场侧注入的分子束加料系统,对偏滤器位形下不同位置的加料效果进行

了对比和分析.

8790 次放电是典型的分子束弱场侧注入实验. 图 2(a)—(i) 显示的是放电的基本参数和放电波形. 放电进行到 303 ms 时,分子束脉冲注入,分子束工作气压为 1.2 MPa ,等离子体温度整体下降,温度分布先出现短暂的峰化,随后迅速平化. 与温度的表现相反,电子密度随着分子束的注入整体上升,密度分布先是有短暂的平化,之后峰化. 这个现象表明分子束由于其具有良好的定向性特点,能够在一定的范围内较积聚地注入等离子体,将粒子带入一定的深度,使整体密度明显地上升. 由于粒子源的温度较本底等离子体低,也造成了整体等离子体的冷却. 由于等离子体的压力剖面不变性,导致温度与密度的分布形态的互补变化. 图 2(j), (k) 为中心道与边缘道电子密度积分信号在分子束注入期间的演变曲线. 从图中可以看出,边缘的密度早于中心的上升,且上升速率为 $0.04 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{ms}^{-1}$,快于中心道的值. 为了清楚地了解分子束与等离子体相互作用的过程,将多道的密度线积分数据进行 ABLE 反演获得了密度的空间分布随时间的演变(见图 3). 分子束在 303 ms 进入等离子体,边缘密度快速上升,由于边缘上升率高于芯部上升率,整体等离子体密度呈现平化. 20 ms 后芯部密度迅速上升,边缘等离子体收缩,密度峰化.

为了方便对比,强场侧注入(8568 次放电)的放电波形用 8790 次放电相同类型的图和信号显示. 由

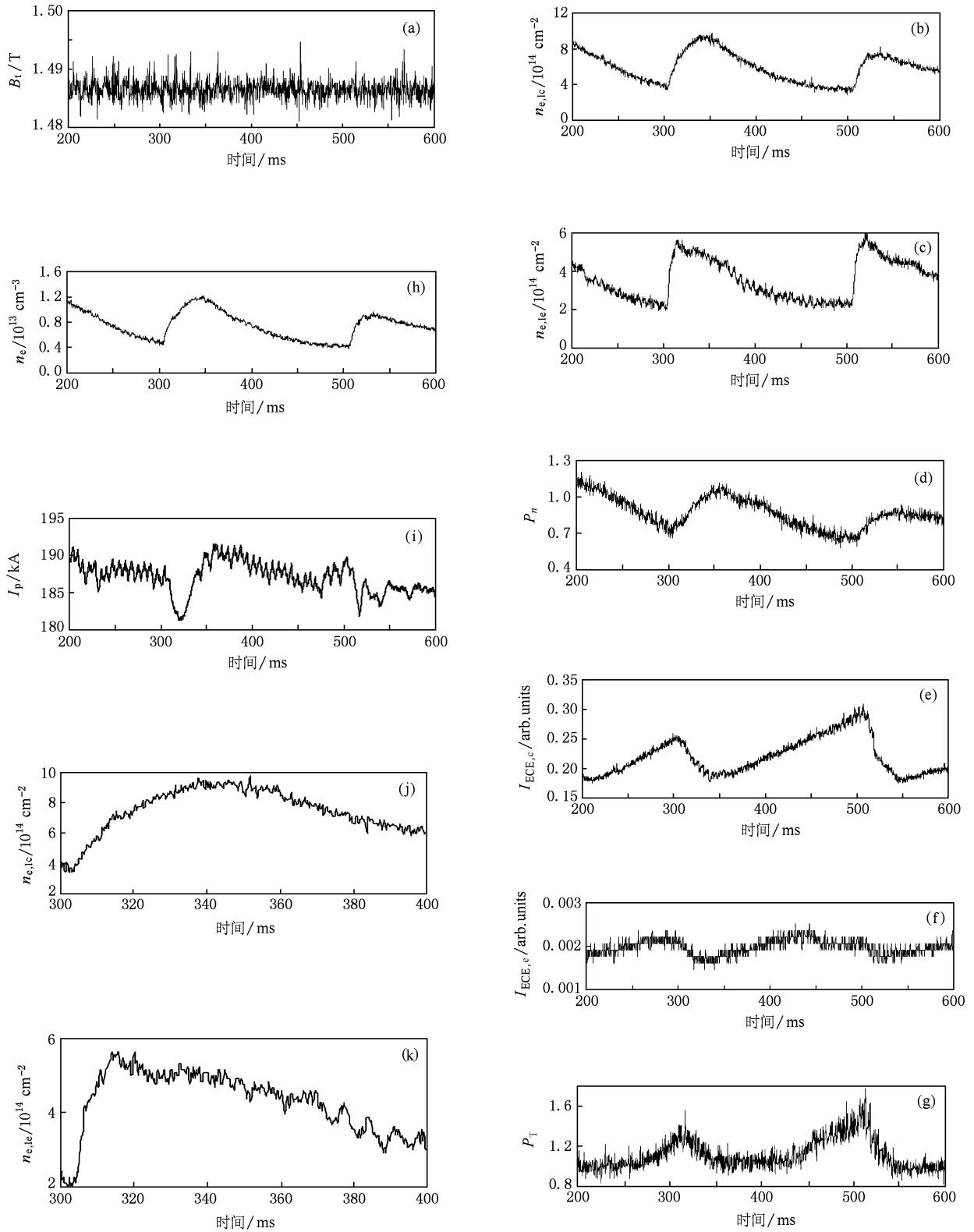


图2 8790次放电分子束弱场侧注入典型放电波形 (a)~(i)为放电基本参数随时间变化曲线,(j),(k)为芯部与边缘线密度随时间演变。(a)等离子体环向磁场 B_t , (b)中心道线积分电子密度 n_{e,l_c} , (c)边缘道线积分电子密度 n_{e,e_c} , (d)密度峰化因子 p_n , (e)中心道电子回旋辐射强度 $I_{ECE,c}$, (f)边缘道电子回旋辐射强度 I_{ECE,e_c} , (g)温度峰化因子 P_T , (h)线平均电子密度 n_e , (i)等离子体环电流 I_p , (j)芯部线积分电子密度 n_{e,l_c} , (k)边缘线积分电子密度 n_{e,e_c}

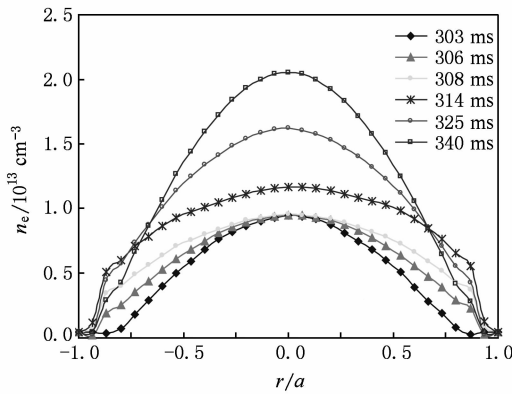


图3 8790次放电分子束注入期间密度分布的演变

图4和图5的曲线可以看出,强场侧注入,所有密度测量道的上升几乎是同时发生,芯部与边缘密度同时上升,分布几乎不变;强场侧注入密度的上升率为 $0.41 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{ms}^{-1}$,比弱场侧高一个数量级.通过测量等离子体电子密度的增加量与分子束注入的粒子量的比值,可获得分子束加料的效率.实验和计算结果表明,在偏滤器放电位型下,强场侧分子束的加料效率为40%—50%,弱场侧加料效率为30%—40%.

5. 电离粒子的磁场梯度作用和 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移

芯部的 Tokamak 等离子体加料是达到高约束区域的有利条件.通常的分子束加料是由 Tokamak 等离子体的外侧(低场侧 LFS)注入,需要大于 500 m/s 以上的速度才能在等离子体中穿透较深的距离(约 0.6—0.8 a).带电粒子由于磁场的曲率和梯度漂移,在等离子体中出现上下的电荷分离(电子向下漂移,离子向上漂移),产生向下的电场,并形成一个通道.在 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 的效应下消融并离子化的束分子粒子沿大半径方向向等离子体芯部扩散(见图6).

而在最近的 HL-2A 实验中,通过在等离子体内侧(高场侧 HFS)安装了分子束注入系统,使得内侧注入比通常的外侧注入具有更深的穿透,有了更好的加料效果.

由于分子束注入在 Tokamak 的中平面上,磁场的曲率漂移可以忽略.由单粒子轨道理论,磁场的梯度效应产生的漂移可由下式描述:

$$\mathbf{v}_{\nabla B} = \pm \frac{1}{2} v_{\perp} r_L \frac{\mathbf{B} \times \nabla B}{B^2}, \quad (1)$$

这里, $v_{\perp} = v_b$ 为分子束注入速度, $r_L = mv_{\perp}/qB$ 为粒子的 Larmor 半径.在 Tokamak 系统中环向磁场比极向磁场大了两个数量级,这里我们忽略极向场的作用,只考虑环向场.设中平面上沿大半径方向的磁场为

$$B = \frac{R_0 B_0}{R}. \quad (2)$$

则由于磁场梯度效应束粒子受到的上下分离的漂移力可写为

$$\bar{F}_{\nabla B} = \mp \frac{1}{2} q v_{\perp} r_L \frac{\partial B}{\partial R} = \pm \frac{1}{2} \frac{m v_b^2}{R}, \quad (3)$$

这里 q 为带电粒子的电量的绝对值.由(3)式可以看到电子向下漂移,离子向上漂移,形成一个向下的电场 $E = \bar{F}_{\nabla B}/q$.漂移力与分离粒子的静电力达到平衡,并产生一个通道.通道的尺度可由下式表示:

$$L = \left(\frac{n_b q q}{4\pi \epsilon_0 \bar{F}_{\nabla B}} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

消融的分子束粒子在 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 的效应下,沿大半径方向以如下增加的速度向等离子体芯部扩散:

$$\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}. \quad (5)$$

内侧注入的电离粒子将以 $v_b + v_E$ 的速度向等离子体芯部传播,外侧注入的电离粒子则以 $v_b - v_E$ 的速度向等离子体芯部传播.

上述公式本身是精确的,但是忽略了许多物理过程,如粒子的碰撞,边缘等离子体参量的涨落(特别是磁场的扰动),以及很多的随机过程.这些过程是应该考虑的.上述的过程是我们讨论的主要过程,单粒子轨道理论虽然简单,但是对于理解分子束加料的穿透和消融过程有重要的意义.

6. 结论与讨论

上面的实验结果已经比较明确地表明了分子束内侧注入加料的优点.由(2)式纵场反比于大半径, ∇B 沿大半径方向快速减小. ∇B 产生的 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移在内侧远大于外侧.内侧注入产生的驱动速度可达 10^8 m/s ,这一速度远大于分子束的注入速度.在外侧由于 ∇B 很小,效应可忽略.

1) 就位形本身而言,强场(内侧)注入的分子束其注入深度相对于弱场(外侧)注入也要深.这一优点来源于磁面位形结构,内侧磁力线比较密,相

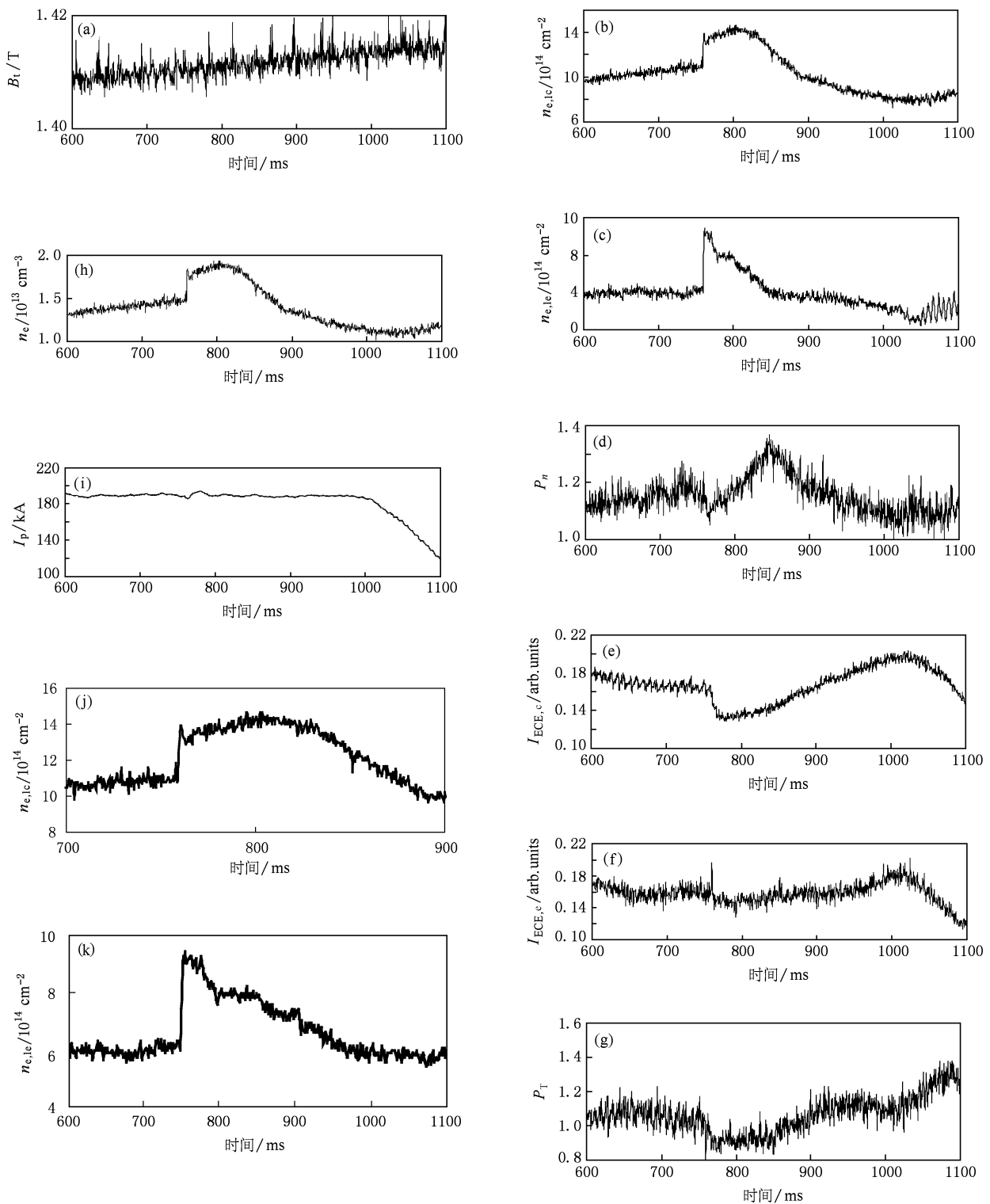


图4 8568次放电分子束强场注入典型放电波形 (a)–(i)为放电基本参数随时间变化曲线,(j),(k)为芯部与边缘线密度随时间演变。(a)等离子体环向磁场 B_t , (b)中心道线积分电子密度 $n_{e,lc}$, (c)边缘道线积分电子密度 $n_{e,le}$, (d)密度峰化因子 p_n , (e)中心道电子回旋辐射强度 $I_{ECE,c}$, (f)边缘道电子回旋辐射强度 $I_{ECE,e}$, (g)温度峰化因子 P_T , (h)线平均电子密度 n_e , (i)等离子体环电流 I_p , (j)芯部线积分电子密度 $n_{e,lc}$, (k)边缘线积分电子密度 $n_{e,le}$

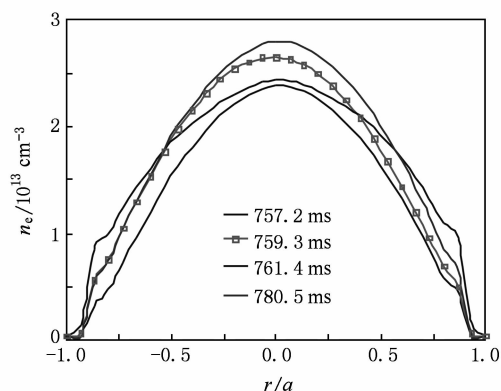


图5 8568次放电分子束注入期间电子密度分布的演变

比外侧分子束经过较短的几何距离即可进入等离子体芯部区域,有利于芯部加料.

2) 在碰撞的特征时间内,由于 $E \times B$ 和磁场梯度作用,电离后的分子束粒子(电子和离子)将以漂移速度向外侧运动,因而内侧注入的分子束有更好的注入深度.

本文对分子束加料位置的理论分析和实验达到了定性和半定量的一致,更深入的工作可包括更

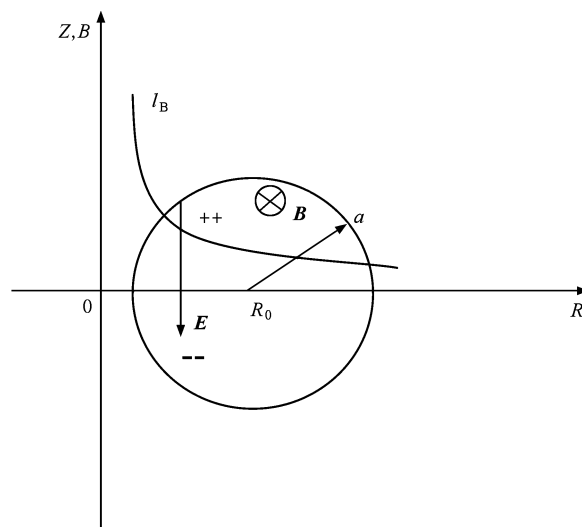


图6 等离子体小截面与磁场、电场相互关系示意图 圆代表等离子体小截面,曲线 I_B 代表纵向磁场随大半径方向的变化, Z 代表等离子体截面的几何尺寸

全面的物理过程的考虑,分子束注入角度及扩散过程等将是今后的工作.

- [1] 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
- [2] 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、酆文忠、徐德明、洪文玉 2002 物理学报 **51** 596]
- [3] 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]
- [4] 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
- [5] Jiao Y M, Zhou Y, Deng Z C, Ding X T, Liu Y, Wang E Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1600
- [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, Pégourié 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, Chankin 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] Jiao Y M, Zhou Y, Yao L H, Dong J Q 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** 2001
- [11] Yao L H, Feng B B, Chen C Y, Feng Z, Li W, Jiao Y M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4159 (in Chinese) [姚良骅、冯北滨、陈程远、冯震、李伟、焦一鸣 2008 物理学报 **57** 4159]
- [12] Liu Y, Yan J C, Zhou C P, Ding X T, Wang S J, Wang E Y, Yao L H, Mao W C, Pang C H 2004 *Nucl. Fusion* **44** 372
- [13] Zhou Y, Deng Z C, Liu Z T, Yi J, Tang Y W, Gao B Y, Tian C L, Li Y G, Ding X T 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 3503
- [14] Ding X T, Zhou Y, Deng Z C, Xiao W W, Liu Z T, Shi Z B, Yan L W, Hong W Y, Yang Q W 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10F528
- [15] 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]
- [16] Duan X R, Cao Z, Cui C H, Cai X, Sun H J, Ding X T, Pan Y D, Wang M X, Yang Q W, Song X M, Liu D Q, Liu Y, Ji X Q, Cui Z Y, Zhou Y, Liu Y, HL-2A team 2007 *J. Nucl. Mater.* **363—365** 1340

Impact of injecting positions on penetration and deposition of supersonic molecular beam on Tokamak*

Jiao Yi-Ming[†] Yao Liang-Hua Feng Bei-Bin Chen Cheng-Yuan Zhou Yan Shi Zhong-Bing

Dong Jia-Qi Duan Xu-Ru

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

(Received 8 November 2009; revised manuscript received 11 December 2009)

Abstract

Fuelling and particle control are important topics for ITER physics. Because of the low efficiency of gas puffing and the high cost of pellet injection, other methods were explored in the last decades. A new method for plasma gas fueling, the pulsed supersonic molecular beam injection (SMBI) was successfully developed at Southwestern Institute of Physics in China and applied on HL-1M and HL-2A devices in recent years. SMBI possesses a great advantage over conventional gas puffing, mainly due to the higher instantaneous fueling intensity and speed, smaller spread of velocity and angular distribution of the particles than the latter. In this paper, we report the experiment results of the SMB injected from LFS and HFS in HL-2A device, the effect of ∇B on SMB penetration is considered. During SMB injection in Tokamak, there is a rapid movement of the ablation beam substance towards the outward major radius R direction. The favorable injection from the high field side in order to promote deeper fuel penetration can be obtained. The motion has been attributed to a vertical curvature and ∇B drift current induced inside the ionized ablated SMB particles by the $1/R$ toroidal field variation. The uncompensated vertical drift current inside the weakly diamagnetic ablation particles will cause charge separation at the plasma edge. The resulting electrostatic field induces the $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift to the large R side of the torus.

Keywords: supersonic molecular beam injection experiment, Tokamak plasma, injection position, ablation and penetration

PACC: 5240, 5255G, 3640

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10675043, 10975049)

[†] E-mail: jiaoym@swip.ac.cn