

基于超声分子束和普通充气的聚变等离子体 密度反馈实验研究*

郑星炜¹⁾²⁾ 李建刚^{1)†} 胡建生²⁾ 李加宏²⁾ 曹斌²⁾ 吴金华²⁾

1) (中国科学技术大学核科学与技术学院, 合肥 230027)

2) (中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2012年12月3日收到; 2013年3月18日收到修改稿)

本文介绍了全超导托卡马克装置 EAST 实验中等离子体密度反馈的方法和结果. EAST 密度反馈采用普通充气 (gas puffing) 和超声分子束 (supersonic molecule beam injection, SMBI) 在放电过程中反馈进气, 获得稳定、预期的等离子体密度. 典型的一天放电实验中, 每次放电的充气量和壁滞留的变化可分为两个阶段: 第一阶段为初始约 20 次放电, 该阶段充气量非常高且呈指数趋势下降, 粒子滞留率为 80%—90%, 壁滞留迅速上升. 第二阶段为随后的约 50 次放电, 该阶段充气量较小且保持稳定, 粒子滞留率为 50%—70%, 壁滞留缓慢上升. SMBI 的加料效率为 15%—30%, 延迟时间小于 5 ms. 因此使用 SMBI 进行密度反馈效果优于 gas puffing 反馈, 相同条件下前者充气量较后者减少了 ~30%, 壁滞留减少了 ~40%, 再循环系数也相应减少. gas puffing 反馈时, 采用脉宽调制模式效果优于脉幅调制模式. SMBI 密度反馈可以作为未来 EAST 长脉冲高参数放电的主要手段之一.

关键词: 密度反馈, 超声分子束, 再循环, 壁滞留

PACS: 52.55.Fa, 52.55.Dy

DOI: 10.7498/aps.62.155202

1 引言

等离子体密度是表征等离子体特性的重要参数之一. 在托卡马克物理实验中要求密度能够很好的实现预设波形, 尤其是在高密度情况下, 不仅要求能较稳定地达到较高的密度, 并能长时间的保持较高的密度. 很多因素影响等离子体密度, 如放电的品质、壁的再循环、杂质等. 如何在各种不同的条件下实现对等离子体密度的有效的控制是衡量托卡马克装置实验水平的一个非常重要的指标.

EAST 装置原有密度反馈系统是以根据 HCN 干涉仪信号实时计算得出的弦平均等离子体密度为反馈信号, 采用普通充气为补气手段, 通过脉宽或脉幅调制模式来控制阀门反馈进气. 反馈控制效果取决于充气延迟时间、加料效率等因素. EAST 装置作为超导托卡马克, 其充气系统^[1]在主充气压

电阀之后通过一段长约 3 m 的管道连通到真空室, 偏滤器充气管道长约 5 m, 在充气系统中由于各管路压电阀开启和气体在管道中的流动造成的总延迟时间为 50—250 ms, 而常规托卡马克如 HL-2A^[2]的管道较短, 延迟时间只有几毫秒左右. 因此与常规托卡马克相比较, EAST 密度反馈系统难以根据密度信号及时调整加料, 反馈效果不理想. 而在未来 ITER^[3]运行时, 其 20—30 m 的充气管道将导致 1—3 s 的延迟时间, 因此依靠普通充气进行密度控制将更难以实现.

2012 年度 EAST 实验中, 首次进行了超声分子束加料实验^[4], 并将其集成到原有密度控制系统中, 进行了密度反馈实验. 超声分子束充分发挥了超声分子束流定向和高速的优势, 该技术在多个国内外装置上应用并取得了令人振奋的结果^[5-7]. 在 Tore Supra^[8]装置上成功实现了采用 SMBI 进行长脉冲等离子体密度反馈实验, 实验结果显示 SMBI 反馈

* 国家自然科学基金 (批准号: 11075185, 11021565) 和国家磁约束核聚变能研究专项 (批准号: 2010GB104002) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: j.li@ipp.ac.cn

所需要的粒子数比采用 gas puffing 降低了 30%, 壁滞留降低了约 50%. 本文介绍了 EAST 密度反馈系统的组成, 并对比研究了 gas puffing 反馈和 SMBI 反馈效果及对壁滞留、再循环等的影响.

2 EAST 密度控制系统简介

等离子体密度反馈控制的基本原理在文献 [9] 中已有详尽的阐述, EAST 等离子体密度反馈控制系统可以看成是由密度测量系统、反馈控制系统和脉冲充气系统三大部分组成. 整个控制系统已

经集成到 EAST 总控系统中, 其控制过程如图 1 所示 [10].

原有 gas puffing 充气系统采用两种控制模式来满足等离子体加料需求, 分别是脉幅调制模式和脉宽调制模式 [10]. 脉幅调制模式是连续的电压调制模式, 通过改变控制电压的大小调节压电阀门孔隙的开度, 从而改变进气量; 脉宽调制模式是在确定的脉冲幅值下调节脉冲宽度实现进气量的调节. 通过调节压电阀的打开时间或幅值, 实现对等离子体密度的控制, 这些方法已被成功的应用到 HT-7^[9,10], HL-2A^[2] 等托卡马克上.

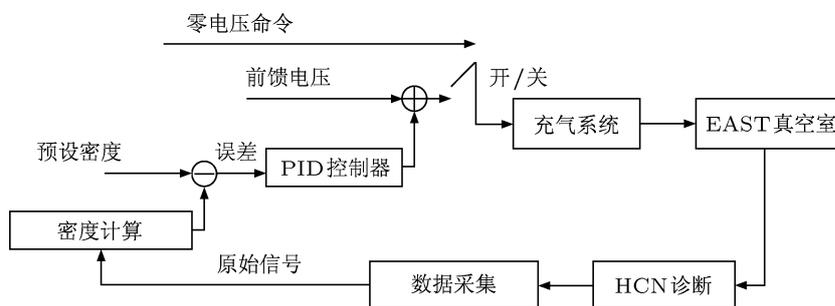


图 1 EAST 密度反馈控制框图

EAST 的 SMBI 系统包括高压气源、脉冲电磁阀、真空抽气系统等. Laval 喷嘴安装在电磁阀出口, 距离等离子体大约 2 m. SMBI 的原理是亚声速气体通过 Laval 喷管膨胀后注入真空区, 会形成超声分子束流. 其主要的优点是注入气体定向速度高于声速, 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 [11]. 经在实验装置上标定, SMBI 进气量与脉宽线性关系良好, 如图 2 所示.

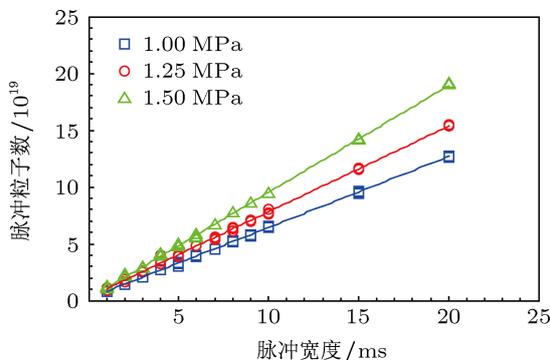


图 2 SMBI 进气量与脉宽的关系

3 实验结果与分析

当放电进入较稳定的状态, 即可采用密度反

馈控制时, 等离子体必须满足两个重要条件: 1) 电流、位移控制的较好, 不会出现大的破裂; 2) 壁条件较好, 再循环系数 $R < 1$, 密度基本可控. 在低密度或高密度放电过程中, 分别采用了 Gas puffing 和 SMBI 进行密度反馈控制. 在放电之前和电流爬升阶段采用 gas puffing 按预设波形程序进气, 以保证电流和等离子体密度的稳定爬升.

3.1 gas puffing 密度反馈实验

采用 gas puffing 反馈在不同的反馈模式下进行实验. 如图 3, 为采用脉宽调制模式反馈的第 40315 次放电. 由上至下分别为等离子体电流、实测密度及预设密度、密度误差 (误差 = | 预设密度 - 实测密度 | / 预设密度)、阀门电压的信号. 在该模式下, 在密度坪顶区等离子体密度保持稳定, 略低于预设值. 在密度爬升和密度下降段误差较大, 是由于在密度爬升阶段程序充气的粒子大量电离导致密度上涨过快, 而在密度下降段, 由于 gas puffing 气体速率低, 并且要通过 3m 管道扩散到真空室, 所导致的延迟时间大约为 100 ms, 即使阀门电压信号已经为零, 仍有气体注入, 密度继续上升一段时间后才下降.

图 4 为采用脉幅调制模式反馈的第 40432 次实验. 该模式下压电阀在整个反馈进气过程中都处于打开状态, 延迟时间在 100 ms 左右, 因此充气量较难以控制, 造成密度的波动, 易造成充气过量. 在该模式下进行反馈实验时, 事先需根据经验设置一定的前馈电压, 由于压电阀孔隙的开度和阀门电压没有一定的函数关系^[12], 且每个压电阀的特性均不同, 因此放电时进气量难以控制, 给密度反馈造成了一定的难度, 所以其效果不及脉宽模式控制.

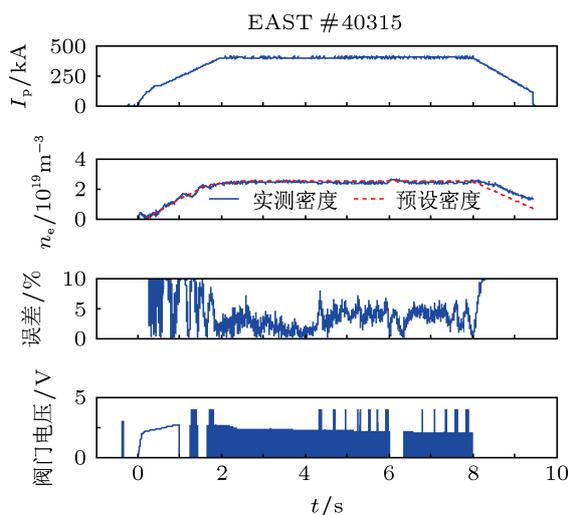


图 3 gas puffing 脉宽模式反馈实验

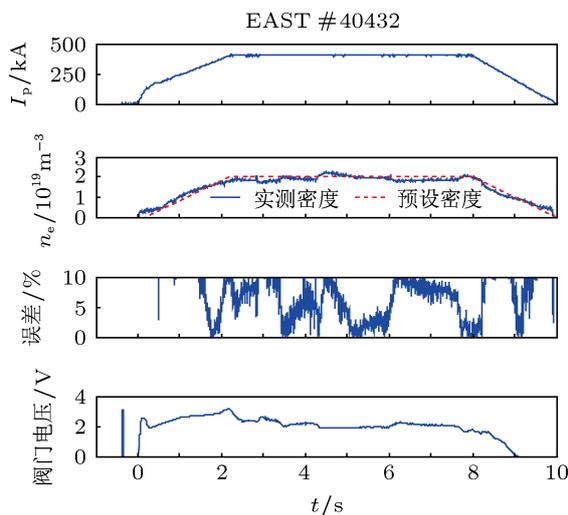


图 4 gas puffing 脉幅模式反馈实验

EAST 每天实验前都会对装置进行 ICRF 清洗^[13]和蒸发镀锂^[14], 以此来提供良好的壁条件. 图 5 为典型的采用 gas puffing 脉宽模式反馈条件下, 在下一天中随着放电次数 (第 41207—41278 次放电) 的增加充气量的变化. 由图中可以看到, 初始

放电时, 由于真空室壁经过 ICRF 清洗和蒸发镀锂后, 壁已经非常清洁, 且新鲜的锂膜能够吸附大量的粒子, 所以放电时需要充入的粒子量很大. 在初始的 20 次左右等离子体中, 每次放电的充气量呈逐渐减小趋势, 在此期间内, 真空室壁条件良好, 锂化后器壁对粒子提供了强有力的泵吸作用, 再循环分量较小, 密度可控. 充气量近似呈指数趋势下降, 到第 20 次后开始出现等离子体破裂现象, 破裂的原因可能是杂质的增长或壁面放气量过大导致等离子体密度不可控增长. 20 次放电后充气量趋于稳定, 说明锂的作用逐渐削弱, 壁的吸附作用趋于稳定. 约 60 次放电后, 壁上已经滞留了大量的粒子而接近饱和, 而壁温随着放电进行持续增高, 因此放气量增加导致密度的不可控进而发生破裂.

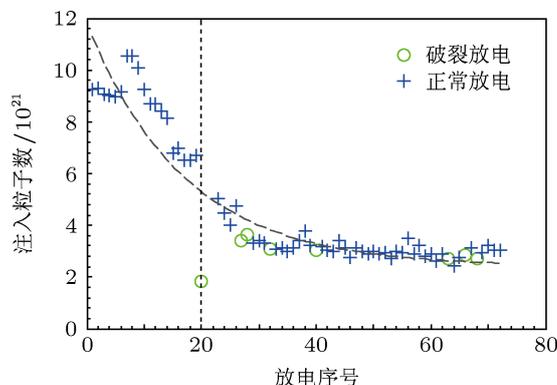


图 5 典型 gas puffing 反馈充气量随放电次数的变化

通过粒子平衡法, 即总的充气量与抽气量的差值, 可以估算壁的滞留情况. 图 6 为每次放电粒子的滞留率随放电进行的变化, 其可以近似分为两个阶段, 第一阶段为放电开始到约 20 次放电左右, 此时, 充入的粒子约 80%—90% 被滞留在壁内, 壁滞留迅速上升. 主要原因由于这一阶段壁表面清洁且锂膜新鲜, 会对实验放电过程中燃料气体有较强的吸附作用. 第二阶段为 20 次放电后至实验结束. 粒子滞留率在 50%—70% 之间, 但由图 5 可以看到此阶段粒子的注入量显著减少, 因此总的壁滞留缓慢上升. 总充气量、抽气量和壁滞留如图 7 所示, 壁的饱和量约为 2×10^{23} .

同时由图 6 可以看出等离子体破裂对壁滞留的影响. 在第 30 和 65 次附近破裂放电中粒子的滞留率几乎为零或为负, 由于等离子体破裂时释放的大量高能粒子轰击第一壁, 导致壁上滞留的粒子大量的被解吸而释放出来^[15], 壁滞留的减少使壁恢复了一定的吸气能力.

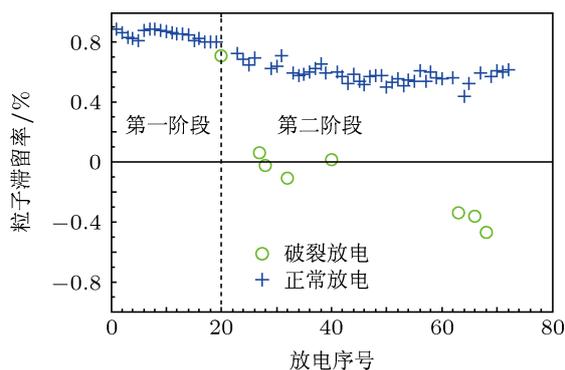


图6 典型 gas puffing 反馈放电下粒子滞留率的变化

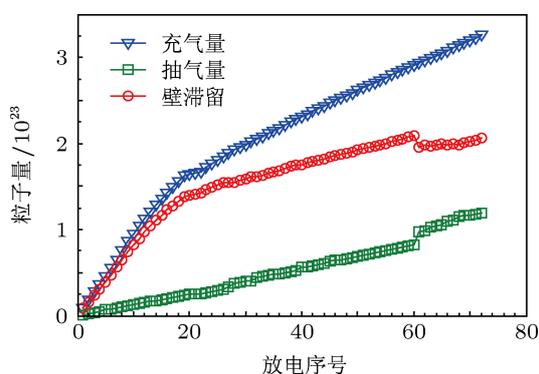


图7 总壁滞留随放电次数的变化

3.2 SMBI 密度反馈实验

由于 SMBI 和 gas puffing 的特性不同, 两者对等离子体的影响也有所不同. 如图 8, 第 40326 次

放电中, 在第 3 s 的 gas puffing 充入脉宽为 50 ms 的 D_2 , 并在第 4, 5 s 使用 SMBI 分别注入 10, 15 ms 脉冲. 由图中可以看到, gas puffing 的延迟时间为 50 ms 左右, 而且密度增长较少, 而 SMBI 脉冲造成的密度涨幅较大, 延迟时间极短 (~ 5 ms), 是因为其阀门距等离子体为 2 m, 分子束的速度能达到 500—1000 m/s, 且电磁阀的打开时间在 1 ms 内. 因此使用 gas puffing 反馈易导致等离子体密度在预设波形上下震荡幅度较大, 反馈效果不佳. 而采用 SMBI 反馈可以及时的对密度的瞬时变化做出反应, 不需要事先设置前馈参数, 反馈效果更好.

在 3 s 处的 gas puffing 脉冲和 4 s 处的 SMBI 脉冲所注入的粒子数均为 9×10^{19} 左右. 脉冲注入粒子的电离导致了 Ha/Da 线辐射的增强和电子温度的降低, 且 SMBI 效果更为显著. 采用文献 [16] 中描述的方法计算出 gas puffing 脉冲的加料效率为 15%, 而 SMBI 的加料效率为 25%—30%, 说明在相同注入粒子下 SMBI 有效充入等离子体的粒子更多. 通过多次脉冲进气实验测得 SMBI 在欧姆放电情况下的加料效率为 15%—30%, 如图 9 所示, 区别于在 Tore Supra^[16] 和 HL-2A^[11] 上 SMBI 加料效率能达到 30%—50%, 主要原因是 EAST 装置的拉瓦尔喷嘴的距离与等离子体相距较远, 且背压不够高 (1.5 MPa), 因此分子束的束流度和速度还不够高, 喷嘴喷出的粒子一部分向周围扩散而未进入等离子体.

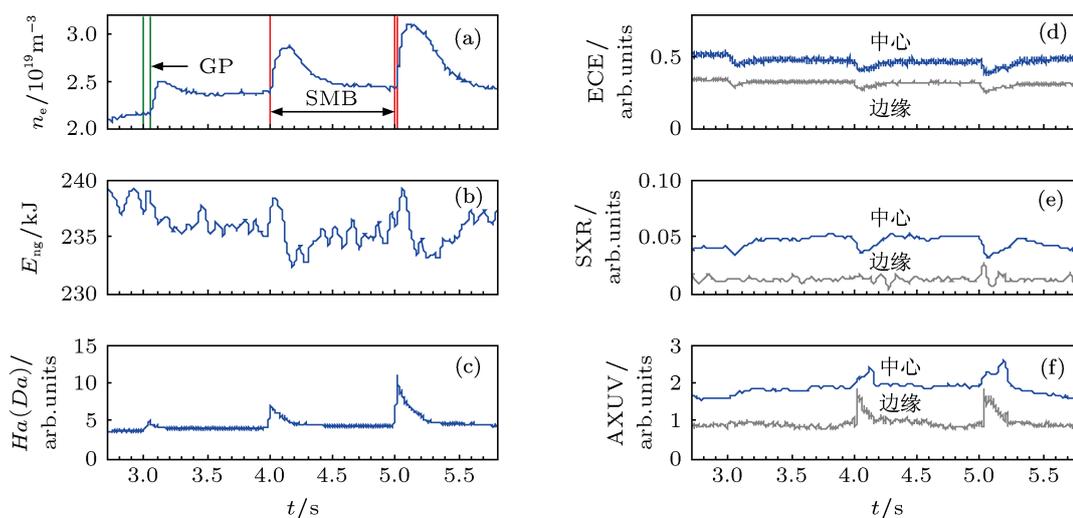


图8 gas puffing 和 SMBI 的比较 (a) 密度; (b) 等离子体能量; (c) Ha/Da 线辐射; (d) 芯部和边缘 ECE 信号; (e) 芯部和边缘 SXR 信号; (f) 芯部和边缘 AXUV 信号

SMBI 已经成功应用于 EAST 装置等离子体密度的反馈控制, 通过调节 SMBI 脉冲注入的频率, 可以及时的调整等离子体密度. 如图 10, 分别在 $2, 2.5, 3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 三个等离子体密度平台下进行实验, 在第 1.2 s 前采用 gas puffing 程序进气时, 充气过量, 导致密度与预设值偏差稍大. 随后采用 SMBI 反馈进气后, 实际密度能紧密跟随预设值, 密度平台非常稳定, 误差仅为 3% 左右. 由于 SMBI 注入速度快, 延迟时间短, 在密度下坡段, 进气立即关闭, 密度与预设波形匹配的较好.

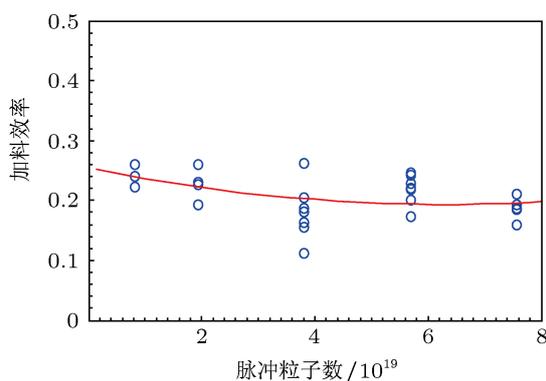


图 9 SMBI 加料效率

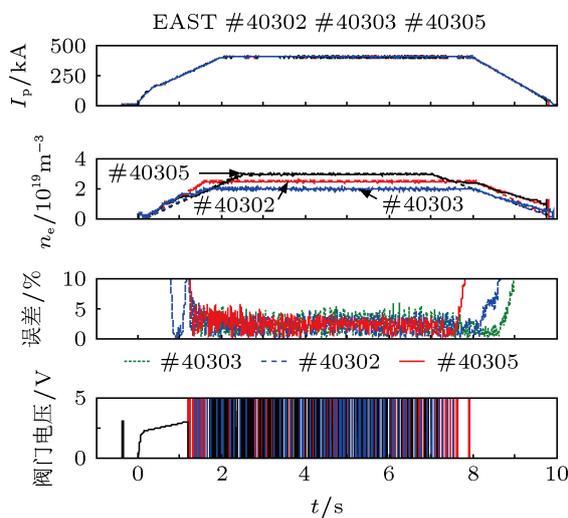


图 10 不同密度平台 SMBI 反馈实验

在 42211 次放电实验中, 进行了密度爬升实验, 如图 11, 等离子体密度按照预设的斜率从 $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 稳定的爬升到 $3.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$. 说明 SMBI 无论在低密度还是高密度下都能够取得良好的反馈效果. 在高密度下使用 gas puffing 反馈时, 由于其速度较低, 且加料效率较低, 需要充入大量的粒子, 这大大增加了边界的再循环和壁滞留, 因

此易导致等离子体品质降低和破裂的发生^[17]. 而 SMBI 由于其充气速率高, 束流度较强, 在高密度下仍然能保持一定的加料深度和加料效率. 因此随着各项等离子体物理参数的提高, 采用 gas puffing 将难以在高密度下有效的加料, 密度反馈将难以进行, 而采用 SMBI 将是合适的选择.

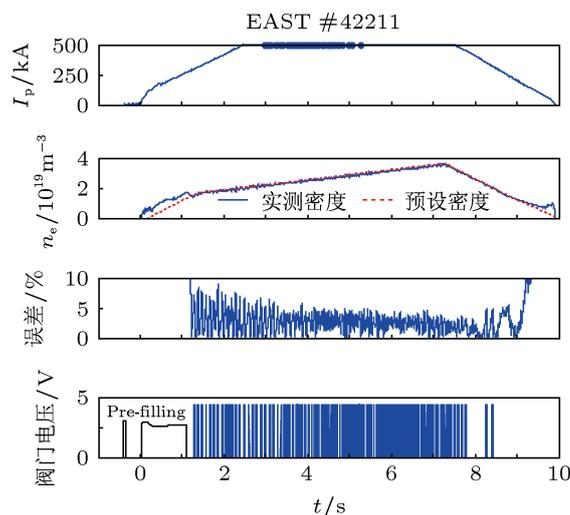


图 11 SMBI 密度爬升实验

图 12 比较了 gas puffing 和 SMBI 反馈时放电过程中壁滞留和再循环的变化. 两次放电的等离子体参数 ($I_p = 0.4 \text{ MA}$, $P_{\text{LHCD}} = 1 \text{ MW}$) 及壁条件均相似. SMBI 反馈所注入的粒子数较 gas puffing 所注入的粒子数减少约 30%, 而两次放电抽气量基本相同, 通过计算得出 SMBI 反馈比 gas puffing 反馈使得壁滞留降低了约 40%.

整体再循环系数 R (the global recycling coefficient) 即进入等离子体的内通量与向外的通量之比, 可以通过以下粒子平衡方程得到^[18]:

$$\frac{dN_e}{dt} = \eta S_g + \frac{(R-1)N_e}{\tau_p}, \quad (1)$$

N_e 为电子总数; η 为加料效率, gas puffing 和 SMBI 分别取为 15%, 25%; S_g 为加料速率, 可通过阀门电压脉冲与进气量的关系得到; τ_p 为粒子约束时间, 是由电子密度和 $\text{Da}(\text{Ha})$ 线辐射所决定的, EAST 标准放电下为 40—50 ms 左右. 由此计算出两次放电的再循环系数 R 如图 12(c). 40312 次放电开始时由于采用连续电压充气注入了大量的粒子, 造成了 R 的快速上升, $R > 1$ 后停止充气, 随后 R 减小至小于 1 并基本保持稳定直至放电末端开始增长. 比较两次放电可以看到整个密度平台区, SMBI 反馈的再循环系数均比 gas puffing 反馈下要小, 原因可能是

SMBI 由于束流度较高加料比较局部,且加料效率较高,对壁滞留的影响较 gas puffing 要小.

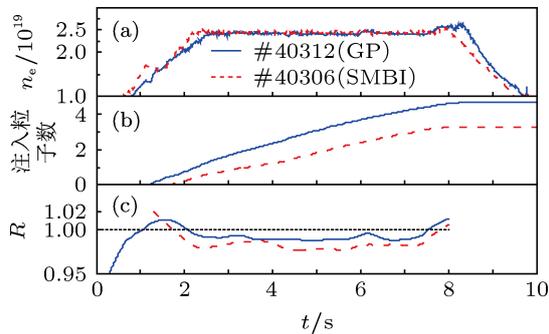


图 12 gas puffing 和 SMBI 密度反馈的比较 (a) 密度; (b) 注入粒子数; (c) 再循环系数 R

4 结论

依靠 EAST 原有密度反馈系统进行实验时,采用脉宽调制模式效果较脉幅调制模式效果要好. 该条件下典型的一天放电实验中,每次放电充气量和壁滞留的变化可分为两个阶段:第一阶段为初始约 20 次放电,该阶段充气量非常高且呈指数趋势下降,粒子滞留率为 80%—90%,壁滞留迅速上升. 第二阶段为随后的约 50 次放电,该阶段充气量较小且保持稳定,粒子滞留率为 50%—70%,壁滞留缓

慢上升.

SMBI 系统的进气量与脉宽线性关系良好,其加料效率为 15%—30%,延迟时间小于 5ms. 使用 SMBI 进行密度反馈时,由于其较高的加料效率和非常短的延迟时间使得其表现明显优于 gas puffing 反馈,通过对比发现相同条件下,前者充气量较后者减少了 $\sim 30\%$,壁滞留减少了 $\sim 40\%$,再循环系数也相应减少.

未来 EAST 进行长脉冲高参数等离子体放电实验时,壁滞留和再循环将直接影响放电的长短和参数的提高. 特别是未来在高密度放电时 gas puffing 的较长的延迟时间和更低的加料效率将使得密度反馈更困难,SMBI 由于其速度较高,束流度较强,在高密度下仍然能保持一定的加料深度和加料效率,采用 SMBI 反馈放电将能有效减少壁滞留和再循环,SMBI 反馈控制能为未来 EAST 高密度、长脉冲、高约束物理实验提供更好的密度控制手段之一. EAST 已经成功安装并实施了稳态冰弹丸注入系统,它的加料效率可以达到 90%以上,深度加料效果更为优越,反馈速度更快. 但弹丸注入的方法对密度扰动加大,很难做到平稳、连续密度反馈控制. 将 SMBI 和弹丸有效结合,一定能在高效、快速、平稳等方面取得更好的结果.

- [1] Wu J H, Wang X M, Hu J S, Chen Y, Wang H Y, Li J H, Wang J, Bao L M 2009 *The Vacuum Engineering Conference Proceedings* p74 (in Chinese) [吴金华, 王小明, 胡建生, 陈跃, 王厚银, 李加宏, 王骥, 鲍立曼 2009 真空工程学术交流论文集, 第 74 页]
- [2] Gao X Y, Tian P H, Cui C H, Cai X 2012 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **32** 158 (in Chinese) [高霄雁, 田培红, 崔成和, 蔡潇 2012 核聚变与等离子体物理 **32** 158]
- [3] Yang Y, Maruyama S, Pitts R, Sugihara M, Li W, Jiang T, Li B 2010 *Fusion Eng. Des.* **85** 2292
- [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, 酈文忠, 徐德明, 洪文玉 2002 物理学报 **51** 596]
- [5] 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]
- [6] Jiao Y M, Yao L H, Feng B B, Chen C Y, Zhou Y, Shi Z B, Dong J Q, Duan X R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7191 (in Chinese) [焦一鸣, 姚良骅, 冯北滨, 陈程远, 周艳, 石中兵, 董家齐, 段旭如 2010 物理学报 **59** 7191]
- [7] 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 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** 1495
- [8] Tsitrone E, Bucalossi J, Loarer T, Pégourié B, Brosset C, Adamek A 2003 *Proc. 30th EPS Conf. on Controlled Plasma Physics* St. Petersburg, 7–11 July 2003 *ECA* Vol. 27A, O-2. 5A
- [9] Luo J R, Ji Z S, Wang X M, Jie Y X 2001 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **21** 237 (in Chinese) [罗家融, 季振山, 王小明, 揭银先 2001 核聚变与等离子体物理 **21** 237]
- [10] Yuan Q P, Xiao B J 2010 *Fusion Eng. Des.* **85** 474
- [11] Shi Z B, Yao L H, Ding X T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4771 (in Chinese) [石中兵, 姚良骅, 丁玄同 2007 物理学报 **56** 4771]
- [12] Wang J, Wang L, Wu J H 2009 *Vacuum* **5** 49 (in Chinese) [王骥, 王玲, 吴金华 2009 真空 **5** 49]
- [13] Hu J S, Wang X M, Li J H, Wu J H, Chen Y, Wang H Y, Yang D W, Luo N C, Li S F, Li G Y, Wang L, Yu Y W, Dou R C, Hu Q S, Bao L M, Zhao Y P, Li J G 2009 *Fusion Eng. Des.* **84** 2167
- [14] Zuo G Z, Hu J S, Li J G 2010 *Plasma Sci. Technol.* **12** 646
- [15] Tang M, Hu J S, Zuo G Z 2011 *Chinese Journal of Vacuum Sci. & Technol.* **31** 37 (in Chinese) [唐明, 胡建生, 左桂忠 2011 真空科学与技术学报 **31** 37]
- [16] Bucalossi J, Tsitrone E 2002 *Proc. 19th IAEA Conf. on Fusion Energy* (Lyon, France, 2002) (Vienna: IAEA) EX/P4-04
- [17] Mukhovatov I V, Shimadal M, Lackner K, Campbell D J, Uckan N A, Wesley J C, Hender T C, Lipschultz B, Loarte A, Stambaugh R D, Goldston R J, Shimomura Y, Fujiwara M, Nagami M, Pustovitov V D, Zohm H 2007 *Nucl. Fusion* **47** S404
- [18] Sakamoto M, Itoh S, Nakamura K, Zushi H, Hanada K, Jotaki E, Pana Y D, Kawasaki S, Nakashima H 2002 *Nucl. Fusion* **42** 165

Investigation of gas puffing and supersonic molecular beam injection density feedback experiments on EAST*

Zheng Xing-Wei¹⁾²⁾ Li Jian-Gang^{1)†} Hu Jian-Sheng²⁾ Li Jia-Hong²⁾
Cao Bin²⁾ Wu Jin-Hua²⁾

1) (*Institute of Nuclear Science and Technology, USTC, Hefei 230027, China*)

2) (*Institute of Plasma Physics, Hefei 230031, China*)

(Received 3 December 2012; revised manuscript received 18 March 2013)

Abstract

To achieve desirable plasma density control, supersonic molecular beam injection (SMBI) feedback control system has been developed on EAST tokamak recently. The performance of SMBI is compared with that of gas puffing feedback system. The performance of pulse width mode is better than that of pulse amplitude mode when gas puffing is used for density feedback control. In one-day experiment scenario, the variation of gas input and wall retention can be clarified into two stages. In the first stage the retention ratio is as high as 80%—90%, and the gas input is of about the order of 10^{22} . However, in the second stage, the retention ratio is in a range of 50%—70%. The gas input of a single discharge is small and the net wall retention grows slowly. The result of SMBI feedback control experiment is also analyzed. The shorter delay time of SMBI makes it more quickly to feedback control the plasma density. Result shows that, compared with gas puffing, the gas input of SMBI decreases $\sim 30\%$ and the wall retention is reduced $\sim 40\%$. This shows SMBI's advantage for the long pulse high-density discharges in EAST.

Keywords: density feedback, supersonic molecular beam, recycling, wall retention

PACS: 52.55.Fa, 52.55.Dy

DOI: 10.7498/aps.62.155202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11075185, 11021565), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2010GB104002).

† Corresponding author. E-mail: j.li@ipp.ac.cn