

HL-2A 装置上超声分子束注入触发 L-H 转换的实验研究*

冯北滨[†] 姚良骅 陈程远 季小全 钟武律 石中兵 余德良
崔正英 宋显明 段旭如

(核工业西南物理研究院聚变科学所, 成都 610041)

(2012年6月12日收到; 2012年7月25日收到修改稿)

利用具有定向速度的超声分子束注入技术, 研究了 HL-2A 装置在较低加热功率条件下实现 L-H 转换的等离子体放电特征, 从边缘密度分布的差异比较分析了普通送气和超声分子束注入对 L-H 转换的影响. 实验结果表明, HL-2A 装置上采用超声分子束注入可直接触发 L-H 转换, 明显降低 L-H 转换功率. 通过对大量实验数据的分析和整理发现, 利用超声分子束注入实现 L-H 转换的最低加热功率, 比同等条件下采用普通送气实现 L-H 转换的最低加热功率减少约 10%.

关键词: 托卡马克, L-H 转换, 超声分子束注入

PACS: 52.55.Fa, 52.25.Fi, 52.55.Dy

DOI: 10.7498/aps.62.015203

1 引言

磁约束高温等离子体高约束运行模式于 1982 年在 ASDEX 装置上首先被发现^[1], 这种被称为 H 模的等离子体放电是未来 ITER(国际热核聚变实验堆)的主要运行模式. 虽然 H 模已实现了三十年, 人们在理论模拟和实验等方面都取得了大量的研究成果, 但对 L-H 转换机理, 以及转换所需的最低功率即所谓的功率阈值与等离子体放电参数之间的关系还不是很清楚, 对机理的理解也存在多种模型, 没有系统的理论支持. 现在对 ITER 阈值功率的估算均依赖于一些基于现有装置实验数据获得的 H 模阈值功率定标率, 但因参数关系的不确定性, 对 ITER 阈值功率的估算仍存在很大的不确定性, 这增加了 ITER 运行初期加热功率有限条件下实现 H 模的难度. 所以在现有装置上研究如何降低 L-H 转换的阈值功率并准确给出阈值功率与放电参数之间的依赖关系十分重要和紧迫.

从实验上看, H 模阈值功率不仅与加热功率密切相关, 还与等离子体表面积、位形、磁场强度、电子密度以及等离子体边缘粒子再循环等因素有关. 在 H 模形成过程中, 等离子体边缘密度分布突然变陡, 形成一个边缘输运垒, 这是等离子体 L-H 转换的重要特征之一. 因此, 在 L-H 转换阈值功率研究中, 人们主要关注边缘等离子体参数在 L-H 模转变过程中的变化. 在 DIII-D 装置上, 曾采用弹丸注入直接触发 H 模, 方法是将进入 DIII-D 装置真空室的弹丸打碎, 使其沉积在等离子体归一化半径 $\rho \geq 0.9$ 附近, 在等离子体边缘产生较大的密度和温度扰动并发生 L-H 转换. 其实验研究表明, 为了实现 L-H 转换, 需要浅表弹丸注入. 浅表弹丸注入使 L-H 模转换的阈值功率降低了 29%^[2]. 近期, HL-2A 装置上实验结果表明, 产生 L-H 转换的功率阈值与超声分子束注入^[3] (SMBI) 有关.

HL-2A 装置在大功率电子回旋共振加热 (ECRH) 与中性束注入 (NBI) 条件下于 2009 年首次在国内实现了 H 模放电^[4]. HL-2A 装置上 H 模放

* 国家自然科学基金 (批准号: 10975049) 和国家科技重大专项 (批准号: 2009GB104007, 2010GB102003) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: fengbb@swip.ac.cn

电的一个特点是大多采用了 SMBI 进行补充加料. SMBI 有很多类似微小弹丸浅表注入的特性, 相对注入深度比普通送气 (GP) 深, 加料效率高, 边缘再循环低等特点. 所以, 本文主要研究了 SMBI 触发 L-H 转换等离子体的时间演化特征、L-H 转换功率以及 H 模等离子体的约束性能, 分析了 HL-2A 装置上 SMBI 触发 L-H 转换机理, 并通过大量实验数据的对比给出了 GP 与 SMBI 分别实现 H 模的 L-H 转换功率.

2 实验装置与补充加料系统

HL-2A 装置是一个具有双零偏滤器位形的中型托卡马克装置, 大小半径分别为 $R = 1.65$ m 和 $a = 0.4$ m, 一般运行在下单零偏滤器位形^[5]. H 模放电期间, 典型等离子体参数为: 环向场 $B_T = 1.2$ — 1.4 T, 等离子体电流 $I_p = 150$ — 180 kA, 中心弦线平均密度 $n_e(0) = 1$ — 2.5×10^{19} m⁻³, I_p 平顶时间大于 1000 ms. 辅助加热系统主要是 2 MW 的 ECRH^[6] 和 1 MW NBI^[7].

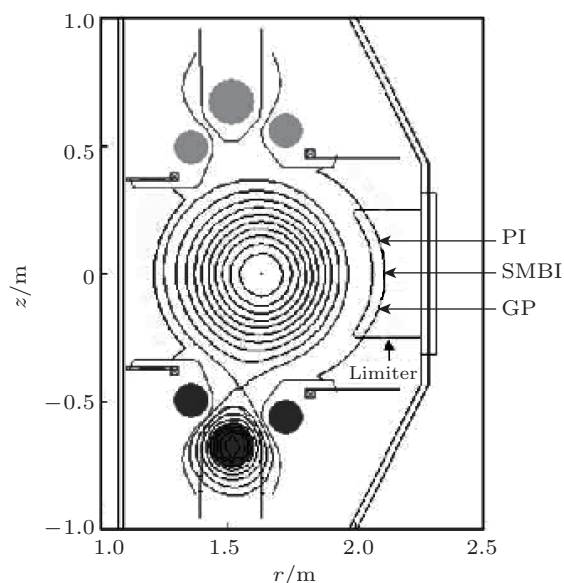


图1 HL-2A 装置加料系统布置示意图

HL-2A 装置加料系统如图 1 所示. SMBI, GP 和弹丸注入 (PI) 被安排在同一窗口水平方向注入, 方便对比三种加料方式对等离子体的影响. SMBI 系统主要由高压气源、脉冲电磁阀 (General Valve Series 99)、低温冷阱、电磁阀驱动器、脉冲时序控制器和真空抽气系统组成. 超声分子束束流主要由钢瓶中的高压氖气通过喷嘴向真空室喷射出的自由射流形成, 粒子流量最高可达 5×10^{21} /s, 束流

速度为 1400 m/s, 通过中平面直径为 350 mm 的圆形窗口水平注入 HL-2A 装置等离子体中. 注入口距离等离子体边缘 1280 mm, 注入深度在 $r/a = 0.8$ 附近^[8]. HL-2A 装置上的 GP 工作阀门为 PV-10 压电晶体阀, 通过控制阀门电压及阀门开启时间来控制注入气量. 阀门的工作电压可设置在 0—120 V 之间, 阀门开启时间小于 2 ms, 进入等离子体中的气量一般不小于 1.33×10^{-2} Pa·m³s⁻¹. 工作气体通过长 $L = 1000$ mm, 直径 $\Phi = 30$ mm 的不锈钢引导管与装置真空室连接, PV-10 压电晶体阀打开时, 燃料气体以扩散的方式进入等离子体. PI 系统^[9] 与 SMBI, GP 安装在装置的另一窗口上.

3 实验结果

3.1 相同加热功率下 SMBI 对 L-H 转换的影响

11329 次放电 (灰色) 是 HL-2A 装置一次典型的 H 模放电, 与 11327 次 L 模放电 (黑色) 对比, 可发现 SMBI 在 L-H 转换中的作用, 如图 2 所示. 两次放电等离子体电流均为 150 kA, 11327 次放电 500 ms 时投入 NBI, 加热功率 $P_{\text{NBI}} = 680$ kW; 放电至 610 ms 时投入 ECRH, $P_{\text{ECRH}} = 660$ kW. 本次放电采用 GP 密度反馈控制方式, 控制信号为 GP 所示. 等离子体密度在 ECRH 投入前一直维持在 HL-2A 装置上 H 模最易触发的密度范围 1.5×10^{19} m⁻³ 附近, 当 ECRH 投入后, 等离子体密度受到 ECRH 使粒子外排 (pump-out) 现象的影响而有所下降. 尽管密度反馈系统采用了较强的 GP 进行补充加料, 但等离子体密度仍没达到设定值. 尽管此次放电的加热总功率 $P_{\text{tot}} = P_{\text{Oh}} + P_{\text{NBI}} + P_{\text{ECRH}} = 1370$ kW, 已远大于 HL-2A 装置实现 L-H 转换的加热功率平均值, 但由于密度偏低, 降低了等离子体对辅助加热功率的吸收, 特别是对 NBI 功率的吸收. 从后面的密度分布测量也观察到, GP 加料不容易建立起有利于 L-H 转换的边缘密度梯度. 同时, pump-out 效应的直接效果是使真空室内中性气体压强 (P) 增加一倍左右, 粒子再循环大大增强, 这或许是阻碍此次放电 L-H 转换的重要原因之一. 因此, 11327 次放电始终处于 L 模放电, 整个放电过程持续 1300 ms.

11329 次放电, 等离子体电流、NBI 加热功率、ECRH 功率大小等都与 11327 次相当, 加热总功率 $P_{\text{tot}} = P_{\text{Oh}} + P_{\text{NBI}} + P_{\text{ECRH}} = 1370$ kW, 与 11327 次放

电一致, 不同之处是补充加料过程中采用了 SMBI 技术. 11327 次放电全程是采用 GP 密度反馈控制方式, 而 11329 次放电则分为两段: 首先是 GP, 密度控制在 $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$; 然后在 600 ms, ECRH 投入前开始采用 SMBI 加料, 同时停止 GP 密度反馈.

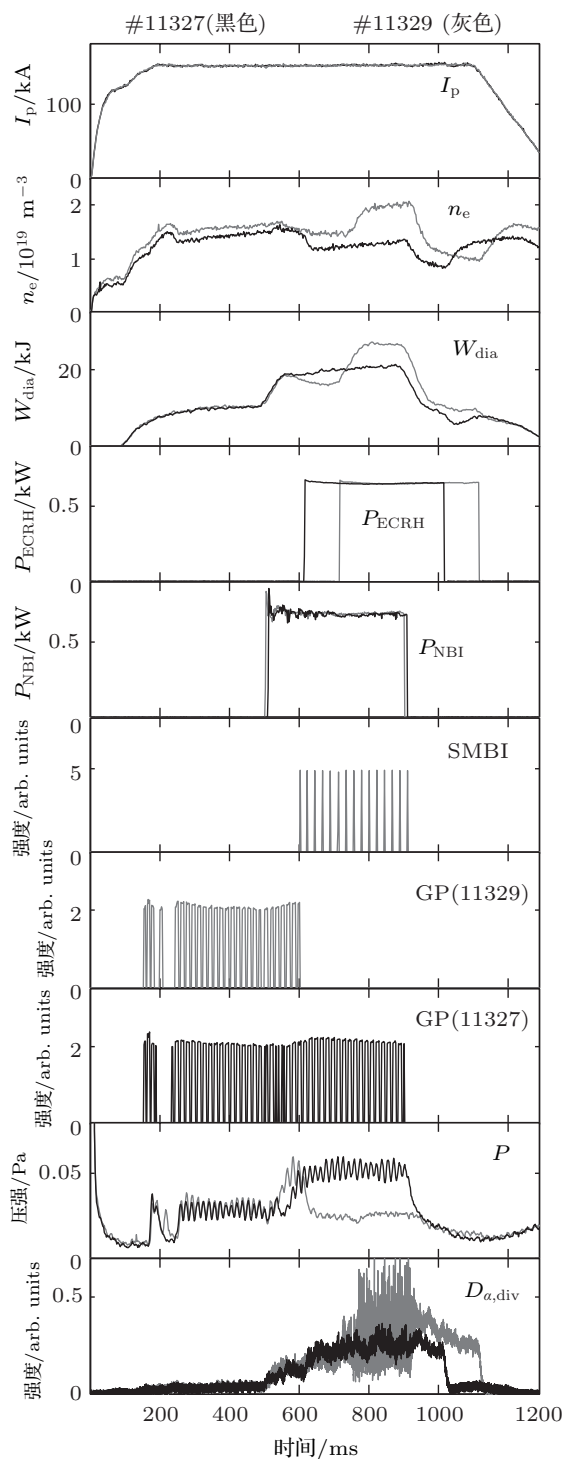


图2 #11327 和#11329 放电波形图 I_p 为等离子体电流; n_e 为电子密度; W 为储能; P_{ECRH} 为电子回旋加热功率; P_{NBI} 为中性束加热功率; SMBI 为分子束注入; GP 为脉冲送气; P 为中性气体压强; D_a 为偏滤器 D_a

从真空室内中性气体压强 P 信号看, SMBI 投入后, 真空室内中性气体压强降低了约 50%, 说明粒子再循环大大降低, 再循环低不仅有利于控制等离子体密度, 实现长脉冲运行, 对实现 L-H 转换也起着重要作用^[10]. 此次放电 ECRH 投入时刻为 700 ms, 等离子体密度虽然仍受 pump-out 效应的影响, 但由于 SMBI 粒子穿透深度和加料效率高于普通送气^[11], 克服了 pump-out 效应带来的等离子体粒子损失, 密度基本保持在预设值, 没有大的变化. 此密度条件十分有利于等离子体对辅助加热功率的吸收, 有利于 H 模边缘输运垒的建立. 因此, 在超声分子束第 7 个脉冲注入后的 733 ms 发生了 L-H 转换, 等离子体密度由 $1.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 上升到 $2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 储能 W 由 17 kJ 增加到 27 kJ, H 模持续时间近 200 ms.

3.2 SMBI 降低 L-H 转换功率

受 DIII-D 装置上弹丸浅表注入触发 L-H 转换、降低阈值功率的实验结果启发, 我们尝试采用 SMBI 来降低 HL-2A 装置 L-H 转换功率. 下面以 15884(黑色) 和 15885(灰色) 相邻两次 H 模放电为例加以说明, 如图 3 所示. 15884 次放电与 15885 次放电等离子体宏观参数基本一致, 等离子体电流 165 kA, 密度 $1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 磁场 1.33 T. 但辅助加热功率相差较大, 其中 15884 次放电辅助加热功率约为 1400 kW, 而 15885 次放电辅助加热功率约为 800 kW, 总加热功率减少了约 40%. 尽管这两次放电都实现了 H 模放电, 但形成 L-H 转换的原因不同. 15884 次放电 ECRH 投入时间为 330 ms, 功率 850 kW; NBI 投入时间为 360 ms, 功率 550 kW. 此次放电采用 GP 密度反馈使等离子体密度控制在 $1.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 从图中可看出, 530 ms 发生了 L-H 转换, H 模持续近 360 ms, 整个等离子体放电持续 1360 ms.

15885 次放电, ECRH 功率仅为 250 kW, 由于辅助加热功率的降低, SMBI 注入前未发生 L-H 转换, 这说明实现 H 模所要求的 L-H 转换条件并不具备. 放电进行到 650 ms 时, 注入三个 SMBI 脉冲, 脉冲宽度 4 ms, 背压 2.0 MPa. 第一个脉冲注入等离子体后, 659 ms 发生了 L-H 转换. 将 15885 次放电在 630—690 ms 展开, 如图 4 所示. 从安装在与 SMBI 注入口同一极向截面的 D_a 信号 (图中 D_a) 可以看出, 在发生 L-H 转换的时刻, 第一个 SMBI 脉冲尚未结束, 等离子体密度由 $1.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 快速上升

到 $1.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 建立起适合 L-H 转换的台基密度, 紧接着在 659 ms 进入一个 2 kHz 的振荡阶段, 这是一种在临界加热功率下, 最后转变到稳定的 H 模之前能在 D_a 信号上观察到的高频振荡, 即所谓的高频颤动 H 模 [12], 680 ms 时刻进入稳定的 H 模.

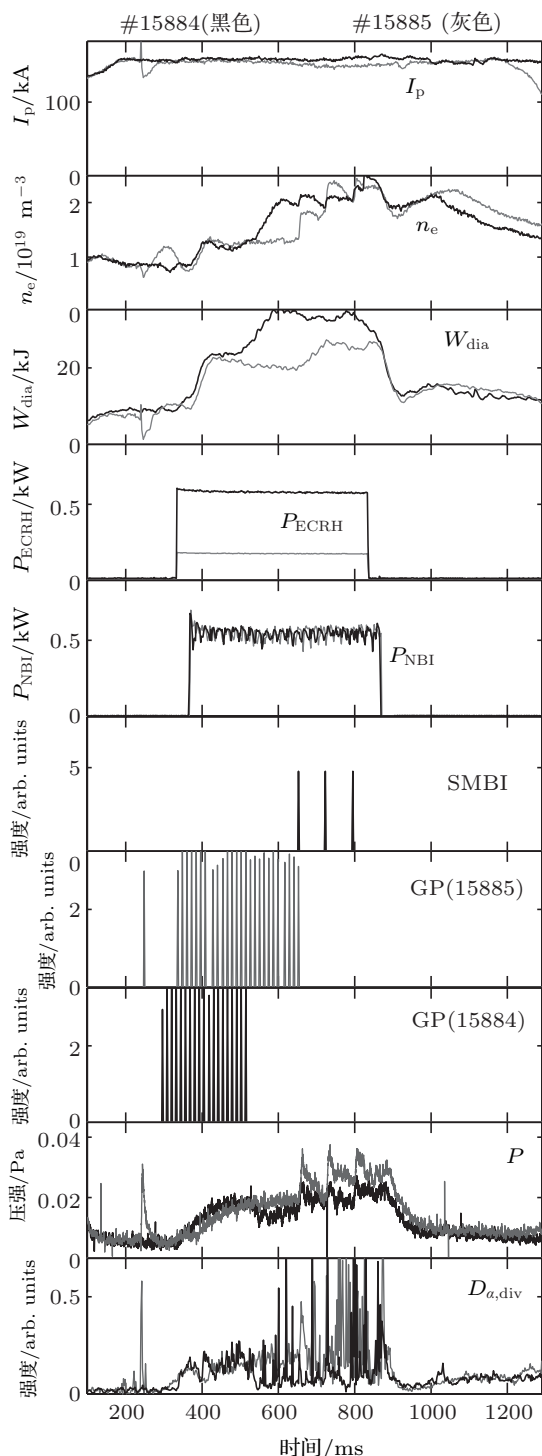


图3 #15884和#15885放电波形图 I_p 为等离子体电流; n_e 为电子密度; W 为储能; P_{ECRH} 为电子回旋加热功率; P_{NBI} 为中性束加热功率; SMBI 为分子束注入; GP 为脉冲送气; P 为中性气体压强; D_a 为偏滤器 D_a

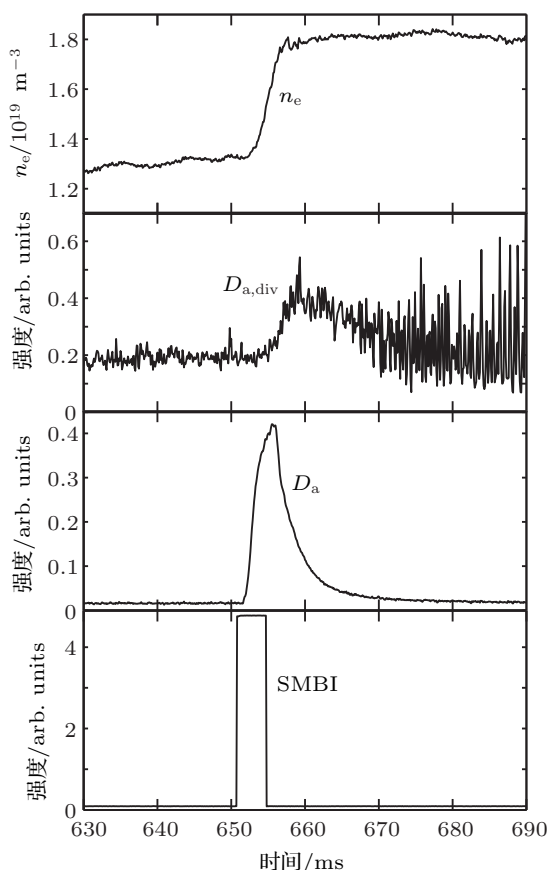


图4 #15885 放电 630—690 ms 展开 n_e , 密度; $D_{a,\text{div}}$, 偏滤器 D_a ; D_a , 分子束注入入口 D_a ; SMBI, 分子束注入

SMBI 起到触发 L-H 转换的作用, H 模放电持续到波加热功率结束.

为了进一步研究 SMBI 在 L-H 转换过程中的作用, 我们在 15253 次放电中的 480, 650 和 780 ms 分别进行 GP, SMBI 和 PI 加料, 研究这三种补充加料引起的等离子体边缘密度分布演化过程, 如图 5 所示. 由微波反射测得的等离子体边缘不同径向位置密度随时间演化 (图 5(a)) 以及这三种加料完成后等离子体边缘密度分布的变化 (图 5(b)) 可以看出, SMBI 与 PI 加料后, 等离子体边缘密度随时间的变化特征十分相近, 均表现为密度上升快, Δn_e 增幅较大, 并且都比 GP 大 25%—30%, 而 GP 加料后, 等离子体边缘密度随时间的演化相对缓慢. SMBI 加料后与 GP 加料后的等离子体边缘密度分布也明显不同, 而与 PI 加料后的等离子体边缘密度分布基本一致. 其主要特征是磁分界面附近的密度梯度 ∇n_e 远大于普通送气后的 ∇n_e , 这十分有利于形成 L-H 转换的边缘压强梯度, 是粒子输运垒形成前必需具备的压强梯度, 也是 SMBI 能够触发 L-H 转换

的重要原因之一。

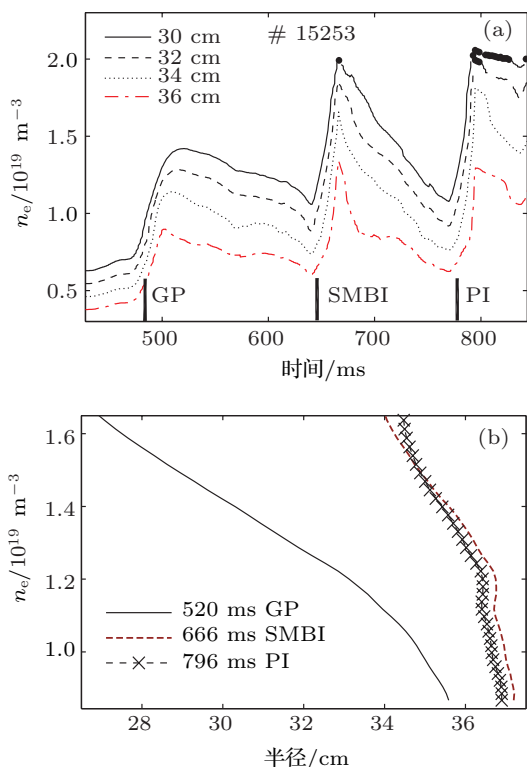


图5 GP, SMBI 和 PI 注入后边缘密度随时间的演变 (a) 以及边缘密度分布 (b)

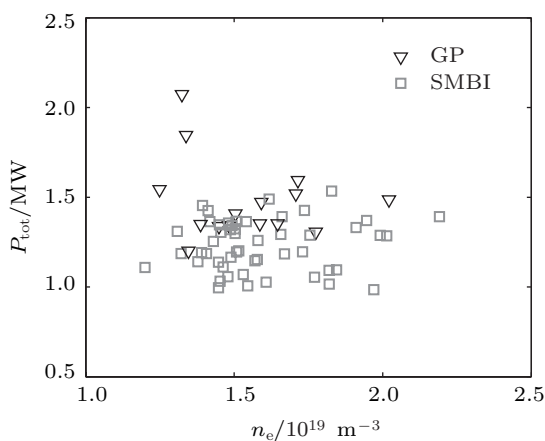


图6 L-H 转换时密度与加热功率的关系

我们选择 HL-2A 装置上百次等离子体放电条件基本相同、放电序号相邻、分别由 GP 和 SMBI 补充加料实现 L-H 转换的放电, 统计分析了加热总功率与等离子体密度的关系, 如图 6 所示。

图中黑色倒三角为 GP 实现 L-H 转换的放电, 灰色方框是 SMBI 实现 L-H 转换的放电. 从图中可以看出, 在一定的运行参数范围内, HL-2A 装置通过 SMBI 进行补充加料比 GP 更容易实现 L-H 转换, SMBI 实现 H 模的最低转换功率比 GP 实现 H 模的最低转换功率降低了约 10%.

4 结论

SMBI 加料后, 粒子沉积位置一般在 $r/a = 0.8$ 附近, 这使得边缘 n_e, T_e 发生了显著变化, 如果说是边缘等离子体参数决定了 L-H 转换阈值功率, 那么 SMBI 使边缘 n_e 上升对形成边缘输运垒可能是非常关键的一步. 在只有欧姆加热的等离子体中, SMBI 注入后, 可以观测到电子密度快速上升后还存在一个慢上升的过程. 此时, SMBI 阀门已经关闭, 监测加料的 D_a 信号也降至较低水平, 但是密度还在继续上升, 线平均密度和监测再循环的 H_a 之比上升, 显示等离子体的约束有改善的迹象^[13]. 在 HL-2A 装置上, ECRH 投入后, 等离子体密度常常受 pump-out 效应的影响而降低, 采用 SMBI 能够弥补由 pump-out 效应所带来的粒子损失, 其主要原因是 SMBI 加料比 GP 加料粒子进入等离子体更深, 效率更高. 这有利于在等离子体边缘建立起较大的边缘密度梯度, 有利于边缘输运垒的形成, 在相对低的加热功率下发生 L-H 转换. DIII-D 装置上由弹丸注入触发 H 模实验, 其 L-H 转换是在弹丸注入后 12 ms 产生的, 而弹丸消融时间一般小于 1 ms. HL-2A 装置 15885 次放电在 SMBI 过程中产生高频颤动 H 模, 随后进入稳定的 H 模, 这说明 SMBI 起到了一个触发 L-H 转换的作用. 在 SMBI 期间, 实验也观察到中性气体压强相对较低, 表明器壁粒子再循环比普通送气低. 与 GP 相比, 更少的注入粒子被器壁吸附, 使得再循环水平降低, 减小了由于再循环粒子而引起的功率损失, 装置再循环低不仅有利于控制等离子体密度, 对降低 L-H 转换阈值功率也起着重要作用. 实验表明, SMBI 是 HL-2A 装置上降低 L-H 转换阈值功率的有效方法, 为研究降低托卡马克装置 L-H 转换阈值功率提供了一种可能的途径。

- [1] Wagner F, Becker G, Behringer K, Campbell D, Eberhagen A, Engelhardt W, Fussmann G, Gehre O, Gernhardt J, Gierke G V, Haas G, Huang M, Karger F, Keilhacker M, Kluber Q, Kornherr M, Lackner K, Lisitano G, Lister G G, Mayer H M, Meisel D, Müller E R, Murmann H, Niedermeyer H, Poschenrieder W, Rapp H, Bohr H, Schneider F, Siller G, Speth E, Stabler A, Steuer K H, Venus G, Vollmer O, Yu Z 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 1408
- [2] Gohil P, Baylor L R, Jernigan T C, Burrell K H, Carlstrom T N 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 644
- [3] 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
- [4] Duan X R, Dong J Q, Yan L W, Ding X T, Yang Q W, Rao J, Liu D Q, Xuan W M, Chen L Y, Li X D, Lei G J, Cao J Y, Cao Z, Song X M, Huang Y, Liu Y, Mao W C, Wang Q M, Cui Z Y, Ji X Q, Li B, Li G S, Li H J, Luo C W, Wang Y Q, Yao L H, Yao L Y, Zhang J H, Zhou J, Zhou Y, Liu Y, HL-2A team 2010 *Nucl. Fusion* **50** 095011
- [5] Duan X R, Huang Y, Liu D Q, Xuan W M, Chen L Y, Rao J, Song X M, Cao Z, Li B, Cao J Y, Lei G J, Li X D, Liu Y, Yang Q W, Yao L Y, Ding X T, Dong J Q, Yan L W, Pan C H, Liu Y, HL-2A team 2011 *24th Symposium on Fusion Engineering* Chicago, USA, June 26–30, SO1B-3
- [6] Rao J, Li B, Zhou J, Yao L Y, Kang Z H, Wang M W, Li L, Feng K, Huang M, Lu Z H, Zhang J S, Li Q, Liu Y 2009 *Nuclear Fusion Plasma Phys.* **29** 324 (in Chinese) [饶军, 李波, 周俊, 姚列英, 康自华, 王明伟, 李立, 冯鲲, 黄梅, 陆志鸿, 张劲松, 李青, 刘永 2009 核聚变与等离子体物理 **29** 324]
- [7] Wei H L, Cao J Y, Rao J, Lei G J, Jiang S F, Liu H, Yu L M, Xie W M, Li M, Yang X F, Zou G Q, Lu D L, Duan X R 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 023302
- [8] Feng B B, Yao L H, Li W, Chen C Y, Feng Z 2008 *Nuclear Fusion Plasma Phys.* **28** 97 (in Chinese) [冯北滨, 姚良骅, 李伟, 陈程远, 冯震 2008 核聚变与等离子体物理 **28** 97]
- [9] Zhu G L, Liu D Q, Xu H B, Vinyar I, Lukin A, Wang M J 2011 *Fusion Engineering and Design* **86** 2286
- [10] Xu G S, Wan B N, Li J G, Gong X Z, Hu J S, Shan J F, Li H, Mansfield D K, Humphreys D A, Naulinfor V, EAST team 2011 *Nucl. Fusion* **51** 072001
- [11] Chen C Y, Yao L H, Feng B B, Zhou Y, Yu D L, Yan L W, Yang Q W, Duan X R 2010 *Proceedings of the 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association* Aomori Japan, October 27–30, 2009 p37–42
- [12] Holzhauser E, Dodel G, Endler M, Gernhard J, Gannone L, Manso M, McCormick K, Mertm V, Niedermeyer H, Rudyj A, Serra F, Siva A, Theimert G, Varela P, Wagner F, Zohm H, ASDEX Team 1994 *Plasma Phys. Control Fusion* **36** A3-A11
- [13] Yu D L, Chen C Y, Yao L H, Dong J Q, Feng B B, Zhou Y, Shi Z B, Zhou J, Han X Y, Zhong W L, Cui Z Y, Huang Y, Cao Z, Liu Yi, Yan L W, Yang Q W, Duan X R, Liu Yong 2012 *Nucl. Fusion* **52** 082001

Experimental study of L-H transition triggered by supersonic molecular beam injection in the HL-2A tokamak*

Feng Bei-Bin[†] Yao Liang-Hua Chen Cheng-Yuan Ji Xiao-Quan
Zhong Wu-Lü Shi Zhong-Bing Yu De-Liang Cui Zheng-Ying
Song Xian-Ming Duan Xu-Ru

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

(Received 12 June 2012; revised manuscript received 25 July 2012)

Abstract

Features of L-H transition are investigated using the supersonic molecular beam injection (SMBI) with directional velocity under low heating powers in the present paper. Comparing the edge density profiles, it is analyzed that the conventional gas puffing (GP) and SMBI have effects on L-H transition. Experimental results suggest that the SMBI does directly trigger L-H transition on HL-2A, and it considerably reduces the power threshold of L-H transition. After abundant experimental data are analyzed and processed, it is found that the minimum L-H transition power with SMBI decreases by 10% when it is compared with GP triggered H-mode under same conditions.

Keywords: tokamak, L-H transition, supersonic molecular beam injection

PACS: 52.55.Fa, 52.25.Fi, 52.55.Dy

DOI: 10.7498/aps.62.015203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10975049), and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2009GB104007, 2010GB102003).

[†] Corresponding author. E-mail: fengbb@swip.ac.cn