

# HL-2A 托卡马克超声分子束注入深度 和加料效果研究\*

石中兵<sup>†</sup> 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

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

(2006 年 11 月 3 日收到, 2007 年 4 月 13 日收到修改稿)

超声分子束注入深度与加料效率是分子束加料研究中的基本课题. 在近期开展的超声分子束注入实验中, 发现分子束注入深度与等离子体电子温度和密度、分子束源的气压和温度有直接关系, 获得了分子束注入深度的定标律. 在低温气体源(液氮冷却)的分子束注入实验中, 发现分子束流中形成了团簇, 其注入深度超过 30 cm, 分析了在低温气源分子束注入实验中的团簇现象.

关键词: 超声分子束注入, 注入深度, 加料效率, 团簇

PACC: 5240K, 7430C, 3640

## 1. 引 言

等离子体加料是聚变研究中最重要课题之一. 因为在等离子体达到聚变点火并能自持反应后就可以不用进行辅助加热, 但是补充加料还得继续进行, 所以研究不同加料条件下, 粒子在等离子体中的沉积和演变等物理行为对未来聚变电站的运行具有重要的作用. 目前在托卡马克上常用的几种加料方法中, 脉冲超声分子束注入是从上世纪 90 年代开始在 HL-1M 装置上发展起来的一种新型等离子体加料技术<sup>[1]</sup>. 由于其具有结构简单、成本低、加料效率高等优点, 这种加料技术先后在 HT-7<sup>[2]</sup>, Tore Supra<sup>[3]</sup>, W7-AS<sup>[4]</sup>, ASDEX-U<sup>[5]</sup>和 HL-2A<sup>[6]</sup>等聚变装置上得到应用.

超声分子束注入系统的送气口是一个 Laval 喷嘴, 它有助于提高分子束的出射速度, 已有多篇文献对 Laval 口形成的射流进行了研究<sup>[7-9]</sup>. 对中小型托卡马克, 利用其给等离子体加料能够充分发挥超声分子束流的定向性和高速的优势, 将分子束高效率地注入到等离子体的芯部或约束区域. 在过去的分子束注入实验研究中, 发现超声分子束注入在改善

等离子体性能方面具有很多优点<sup>[1,7-11]</sup>, 如杂质浓度降低、形成密度峰化、电子温度中空分布、提高能量约束时间等. 等离子体加料深度越深, 加料的效率也会越高, 研究发现超声分子束注入的加料效率介于常规送气和弹丸注入之间<sup>[12]</sup>. 这种加料方法所需的实验设备比弹丸注入要简单得多, 更容易控制. 分子束注入的成本与普通送气差不多, 比弹丸注入技术更经济. 因此有可能发展成为一种先进的等离子体加料手段, 应用于未来聚变堆的加料.

分子束注入的物理机制已有深入的探讨, 提出了若干个分子束注入模型<sup>[13-15]</sup>, 如集体模型和静电双层屏蔽模型等. 虽然这些模型在具体问题上还有争议, 但对解释分子束注入中的实验现象有帮助. 目前的研究倾向认为分子束注入与团簇的出现和中性粒子在注入中的通道屏蔽有关, 否则分子束注入深度很难达到等离子体约束区, 这时的加料效率也应该与普通送气差不多. 可是, 实验发现分子束加料效率要明显好于普通送气. 所以研究超声分子束的注入深度与等离子体参数和注入外部条件的变化关系, 不仅可以为分子束加料实验提供指导, 还有助于分子束加料技术的发展. 经过 10 多年来在 HL-1M 和 HL-2A 装置上的实验, 分子束加料技术得到了快

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

<sup>†</sup> E-mail: shizb@swip.ac.cn

速的发展<sup>[11]</sup>.目前在 HL-2A 上开展的低温气体分子束实验取得了类似弹丸的注入效果.本文主要研究不同等离子体参数和不同外部注入条件下分子束注入深度的变化情况,获得了室温气体分子束注入条件下注入深度的经验定标律.分析了分子束团簇形成时的等离子体参数变化情况,对分子束加料条件下的加料效率进行了比较.

## 2. 实 验

HL-2A 是一个具有封闭下偏滤器的托卡马克<sup>[16]</sup>,目前主要参数如下:大半径  $R = 1.65 \text{ m}$ ,小半径  $a = 0.45 \text{ m}$ ,环向场  $B_t = 2.65 \text{ T}$ ,等离子体存在时间达到  $2960 \text{ ms}$ ,平顶时间超过  $1800 \text{ ms}$ ,平均电子密度和等离子体电流分别为  $\bar{n}_e = 5.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  和  $I_p = 0.4 \text{ MA}$ ,在无辅助加热时的电子温度大约为  $1 \text{ keV}$ .真空室内覆盖有碳纤维复合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.

HL-2A 装置上的超声分子束注入系统结构如图 1 所示.气体由弱场侧向等离子体内部注入.用于产生超声分子束的 Laval 喷口直径  $d = 0.2 \text{ mm}$ ,阀门喷口至等离子体边缘的距离约为  $1.28 \text{ m}$ .在阀门周围缠绕多层、总厚度为  $5 \text{ mm}$  的软铁用于屏蔽 HL-2A 装置的杂散磁场.目前,分子束气体源为氢气,工作气压范围为  $0.2\text{--}3 \text{ MPa}$ .分子束加料系统采用脉冲工作方式,阀门响应时间小于  $1 \text{ ms}$ ,脉冲宽度可调,能产生实验中所需的各种系列脉冲.另外,HL-2A 上的分子束阀门安装在液氮冷阱<sup>[11]</sup>内,以降低工作气体温度.在低温气体分子束注入实验中,先用液氮冷却工作气体,再进行注入.

近年来,在 HL-2A 上已发展了 30 多种诊断,基本可以测量各种等离子体参数.在超声分子束实验中,用远红外激光干涉测量主等离子体平均电子密度,用扫频微波反射(扫频范围为  $26\text{--}40 \text{ GHz}$ ,测量的电子密度范围为  $n_e = (0.8\text{--}2.0) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,时间分辨为  $1 \text{ ms}$ ,空间分辨为  $1 \text{ cm}$ )测量等离子体弱场侧的电子密度分布,用  $2 \text{ mm}$  扫频外差接收机(ECE 诊断,扫频范围为  $104\text{--}181 \text{ GHz}$ ,时间分辨为  $4 \text{ ms}$ ,空间分辨为  $4 \text{ cm}$ )测量等离子体的电子温度分布,用软 X 能谱测量的电子温度对 ECE 进行绝对标定,利用切向  $H\alpha$  阵列测量分子束注入期间粒子源分布<sup>[17]</sup>.切向  $H\alpha$  谱线探测阵列安装在中平面上(共

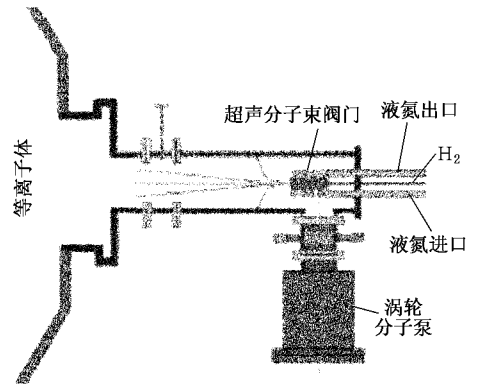


图 1 超声分子束注入系统结构示意图

46 道)其测量视线正好垂直于分子束和弹丸的注入线,如图 2 所示.

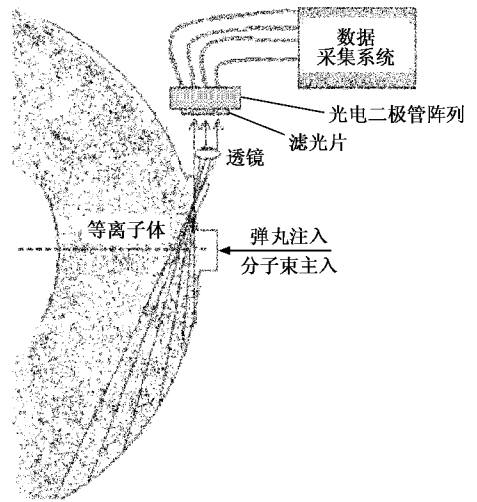


图 2 切向  $H\alpha$  阵列测量区域示意图

## 3. 多脉冲注入时注入深度的傅里叶分析

微波反射测量的等离子体电子密度为定域信号,从密度的变化情况可确定分子束注入粒子源的位置.在多脉冲分子束注入条件下的粒子输运研究中,通过密度脉冲的傅里叶分析,可以得到扰动幅度和相位的径向分布.由扰动相位传播关系可知,如果相位出现谷值,对应位置的幅度为峰值,则说明该位置存在源项<sup>[18]</sup>.图 3 为 3874 炮和 3875 炮在相同注入气压( $0.6 \text{ MPa}$ )、不同本底电子密度下的脉冲分子束实验中,用微波反射测量到的密度扰动脉冲做傅里叶变换后的幅度和相位分布情况.对于 3874 炮,在分子束注入期间平均密度范围为  $n_e = (1.1\text{--}$

$2.4) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 在半径  $r = 23 \text{ cm}$  附近, 出现相位谷值和幅度峰值. 对于 3875 炮, 在分子束注入期间平均密度范围为  $n_e = (2.2-3.1) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 在半径为  $28 \text{ cm}$  附近, 出现相位谷值和幅度峰值. 由于微波反射测量的电子密度为定域信号, 因此上述扰动幅值和相位关系反映了粒子深入等离子体的位置, 即分子束注入深度. 在分子束从等离子体外向内注入的过程中, 分子束本身会不断地被等离子体消融, 造成粒子源的定域性变差, 所以在出现相位谷值位置的外侧幅度和相位变化的线性关系不是很好, 但是

它仍可以定量地反映出分子束注入深度, 该值与  $H_\alpha$  测量的结果基本一致. 需特别指出的是, 傅里叶分析要求扰动具有周期性, 且扰动脉冲个数需足够多, 所以在处理单脉冲或脉冲个数较少的实验中, 傅里叶分析不能适用. 在多脉冲注入过程中, 由于本底密度和温度会不断变化, 分子束注入深度也会随之变化. 另外, 每一个分子束脉冲引起电子密度扰动幅度大小也不是完全一样的. 因此, 傅里叶分析得到的分子束注入深度只可以视作在一定等离子体参数条件下的综合或平均效果.

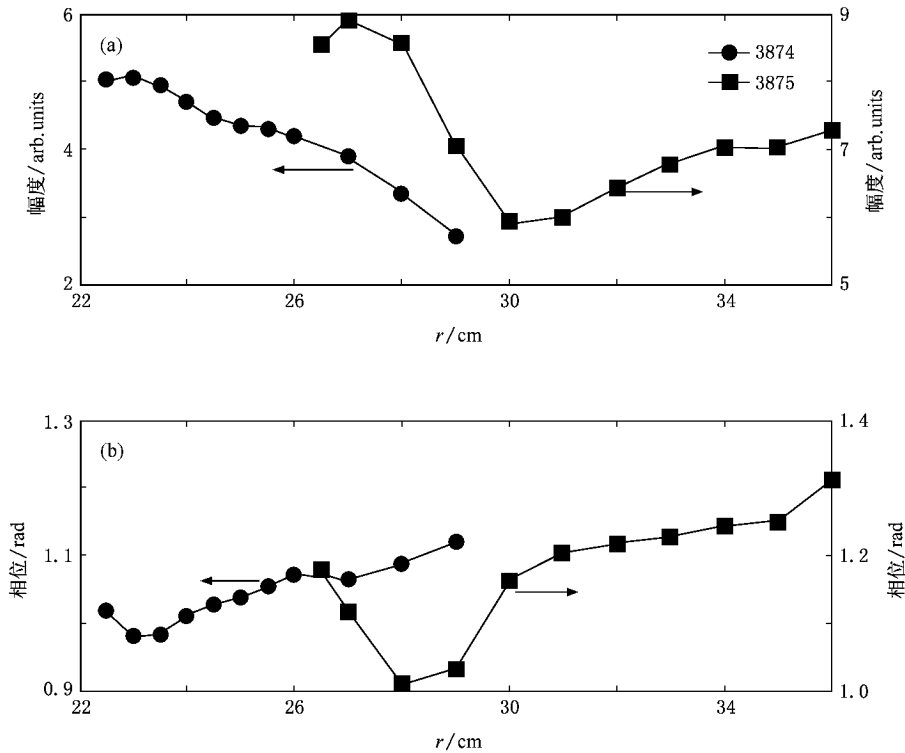


图3 脉冲超声分子束注入期间, 电子密度扰动幅度(a)和相位(b)分布情况

#### 4. 超声分子束注入深度定标律

微波反射测量的等离子体密度范围为  $(0.8-2.0) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 当分子束注入的粒子沉积深度超出微波反射的测量范围时, 就不能获得准确的分子束注入深度, 所以分子束注入深度最好用  $H_\alpha$  来测量. 在目前的实验中,  $H_\alpha$  采用切向探测, 且正好能探测到分子束注入口, 这样获得的分子束注入深度可以消除环向位置对测量的影响. 当在分子束注入进气量较大时,  $H_\alpha$  信号容易饱和, 会给探测造成困难. 在超声分子束注入实验中,  $H_\alpha$  光电二极管阵列前加入

光衰减片以降低  $H_\alpha$  强度, 防止其出现饱和.

分子束注入深度主要受本底电子密度和温度、注入气压等因素的影响. 图 4(a) 为等离子体电流  $I_p = 310-350 \text{ kA}$  的条件下, 分子束注入深度随本底平均电子密度和注入气压的变化情况. (a) 图中圆圈、菱形和方块分别代表气压为  $0.25, 0.6$  和  $3 \text{ MPa}$  时的注入深度, 虚线为等气压下注入深度的趋势线. 需要说明的是, 在高气压条件下分子束注入容易造成  $H_\alpha$  信号饱和, 从饱和  $H_\alpha$  信号不易确定出注入深度. 另外, 在高气压注入条件下分子束阀门还容易出现弹跳现象<sup>[15, 19]</sup>. 图 4(a) 中气压为  $0.6 \text{ MPa}$  时的注入深度分别来自  $H_\alpha$  的测量结果(经光衰减片)和微

波反射的测量结果, 3 MPa 时的注入深度来自于注入后阀门弹跳时产生的  $H\alpha$  信号, 这是因为阀门弹跳时分子束注入的进气量很小, 未造成  $H\alpha$  信号饱和. 从图 4(a) 可以得出: 在相同气压下, 随着注入前本底电子密度上升, 分子束注入深度变浅. 在相同本底电子密度下, 随着气体源气压上升, 分子束注入深度更深. 但在本底电子密度和电子温度都较低的情况下, 若采用高压分子束注入, 容易引起很强的磁流体动力学不稳定性, 导致等离子体破裂. 图 4(b) 为注入深度随平均电子温度的变化情况. 从图 4(b) 可以发现, 注入深度随电子温度升高而减小, 即等离子体温度越高, 分子束越难注入到等离子体内部. 在 Tore Supra 装置上, 由于等离子体的温度和密度较高, 很少观察到分子束注入深度超过  $r/2$  的位置. 但在 HL-2A 欧姆加热条件下, 等离子体参数较低, 分子束较容易注入到等离子体约束区.

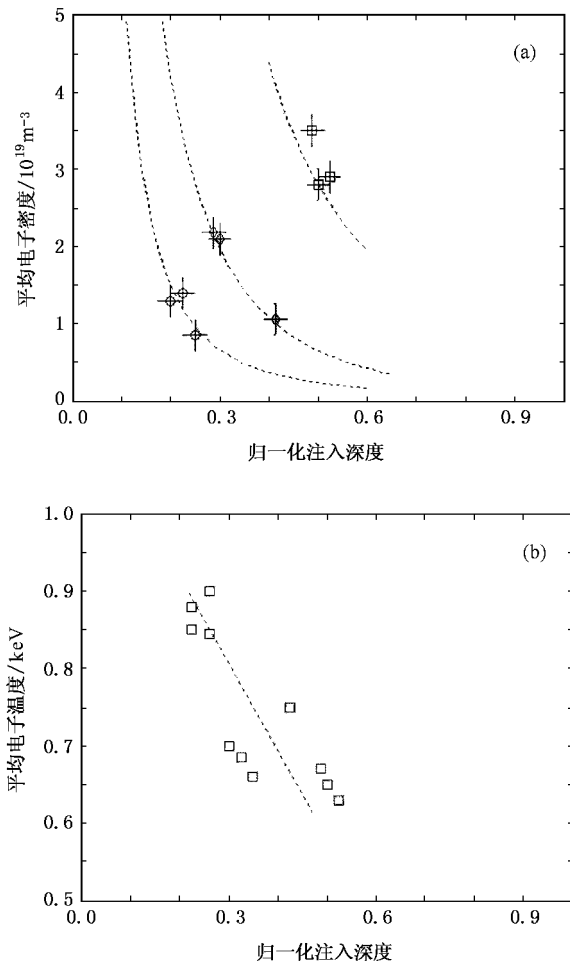


图 4 归一化注入深度与本底平均电子密度 (a) 和平均电子温度 (b) 的关系. 虚线为注入深度变化的辅助线. (a) 图中三条曲线及相应的圆圈、菱形和方块分别代表分子源气压  $P = 0.25$ 、 $0.6$  和  $3$  MPa.

分子束注入深度主要由注入前等离子体平均电子密度、电子温度和气体源的气压等参数决定, 从图 4 可以得到下列归一化分子束注入深度公式:

$$d = C \frac{P^{0.3}}{\bar{N}_e^{0.2} \bar{T}_e^{0.6}}. \quad (1)$$

这里  $C$  是与 Laval 喷口的几何尺寸和分子束源的气体温度等参数有关的一个系数, 实验中取  $C = 0.35$ ;  $d$  为归一化注入深度;  $\bar{N}_e$  为平均电子密度,  $\bar{N}_e = 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ;  $\bar{T}_e$  为平均电子温度, 单位为 keV;  $P_0$  为分子束源的气压, 单位为 MPa. 经分析发现, 定标公式与实验测量的结果符合得较好 (见图 5). 从上述经验定标律可以发现, 在室温条件下等离子体电子温度对注入深度的影响最大, 分子源气压的影响次之, 等离子体电子密度的影响最小. 这与 NGS 模型得到的弹丸注入深度定标律和国际弹丸加料实验数据库的结果<sup>[20]</sup> 相似. 另外, 分子源的气压越高, 注入深度也会越深, 但注入深度的变化随气压的升高而越来越小.

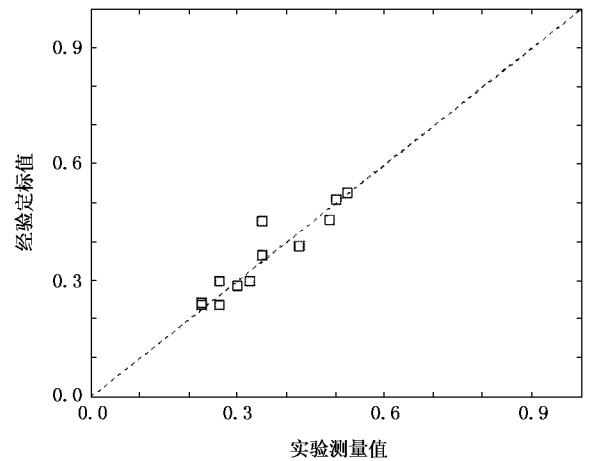


图 5 超声分子束注入深度经验定标值与实验测量值的对比

## 5. 超声分子束实验中的团簇现象

团簇是由大量的原子或分子靠化学或物理的相互作用结合在一起而形成相对稳定的微观或亚微观聚集体. 在高压分子束注入过程中, 分子经过 Laval 喷口后绝热膨胀, 将粒子随机的热能转化为平动能, 分子束射流中心在过饱和状态下凝聚成团簇. 产生团簇的条件与 Laval 喷口的形状、气体源的气压和温度等参数有关<sup>[9]</sup>. 在超声分子束中出现团簇的 Hagen 经验定标律为

$$\Gamma^* = \frac{k(D/\tan\alpha)^{0.85} P_0}{T_0^{2.29}} \quad (2)$$

这里  $k$  为与加料粒子种类有关的一个常数,对于  $H_2$ ,  $k = 184$ ; 对于  $O_2$ ,  $k = 1400$ ;  $D$  为 Laval 喷口的直径,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $\alpha$  为分子束通过阀门后的膨胀半角,  $\alpha = 45^\circ$  为声速,  $\alpha < 45^\circ$  则为超声速;  $P_0$  为气体源气压,单位为  $10^2 \text{ Pa}$ ;  $T_0$  为注入气体源的气体温度,单位为  $\text{K}$ ,目前采用室温和液氮两种温度注入.在超声分子束注入条件下,  $\Gamma^*$  值越大越容易形成团簇,经验得出,当  $\Gamma^* > 100\text{—}300$  时即可能出现团簇.团簇形成的另一个条件是分子束注入速度须达到超声速.如果分子束注入的速度较低、定向性较差,分子束在通过阀门后会迅速膨胀、扩散,这时加料和普通送气相似.由(2)式可知,降低注入气体源的温度和增加气压有利于团簇的形成,并可使团簇内的粒子数大大增加.在目前的实验中, Laval 喷口的直径  $D = 200 \mu\text{m}$ ,分子束气体源的气压最高达  $3 \text{ MPa}$ ,因此在室温高压或低温分子束注入实验中有可能形成团簇.当分子束注入形成团簇后,它的离解需要更多的能量,更有利于穿透.

由 Hagen 经验定标律可得出,如果降低分子束气源的温度、提高气源气压,即可以达到团簇的形成条件.在分子束注入实验中可以根据实验需要选择注入参数.另外,在高压条件下,经常观察到分子束阀门产生振荡,阀门在经过几次振荡后才会完全关闭,即高压下的分子束阀门弹跳现象.文献 [15, 19] 中观察到分子束阀门出现弹跳时,瑞利散射信号成倍地增长,说明在超声分子束流中出现了团簇.从这些实验中发现注入脉冲时间越短,团簇的尺寸越大.在分子束出现弹跳时,虽然总的注入粒子数减少,但是团簇的尺寸较大,所以等离子体对分子束阀门弹跳时的响应更大.

当分子束束流中出现团簇后,将有利于注入粒子的穿透,注入深度也会更深.这时注入粒子主要沉积在等离子体内部,从而使器壁吸附减小,等离子体的电子密度增加得更多,加料效率也会提高.图 6 为分子束气源为液氮温度时,观察到的平均电子密度变化情况.由于在分子束束流中存在团簇,注入粒子需要更多的能量来消融和离解,观察到两次密度上升的现象,这可能是由于欧姆加热条件下等离子体贮能不够造成的.表 1 为相同气压条件下 ( $1.8 \text{ MPa}$ ) 液氮温度和室温分子束注入深度的比较.为进行对比,表中还给出了在相同气压条件下室温气源分子束注入时的分子束穿透深度,它与经验定标律公式计算得到的结果相近.在低温注入条件下,用  $H\alpha$  阵列观察到分子束注入深度大约为  $32 \text{ cm}$ ,但由经验定标律公式计算出相同参数条件下室温的注入深度大约为  $18 \text{ cm}$ ,即低温分子束的注入深度比室温增加了  $80\%$ .这说明低温气体分子束注入的加料效率得到明显提高.

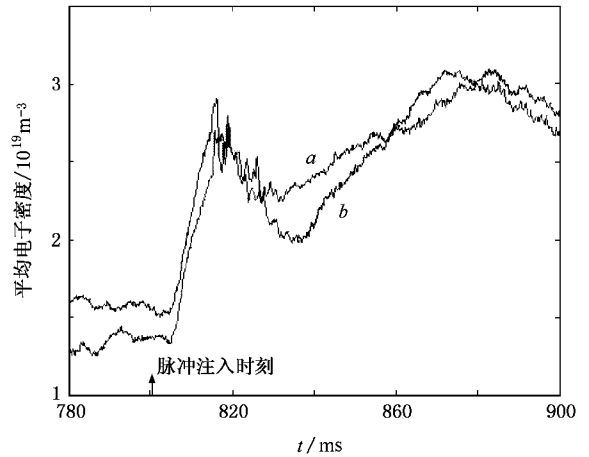


图 6 低温分子束实验中平均电子密度的变化情况.脉冲宽度为  $3 \text{ ms}$ ,气压为  $1.8 \text{ MPa}$ .曲线  $a$  为 4412 炮,曲线  $b$  为 4413 炮

表 1 低温气体分子束注入深度与室温气体分子束深度比较

炮号	气压/MPa	源温度/K	注入前平均密度/ $10^{19} \text{ m}^{-3}$	注入前平均温度/eV	定标律深度/cm	$H\alpha$ 测量深度/cm
4412	1.8	77	1.40	750	18.6	~ 32
4413	1.8	77	1.55	745	18.3	~ 32
4512	1.8	300	2.36	670	17.8	~ 14

## 6. 结论与讨论

超声分子束在等离子体中的穿透和消融包含了比较复杂的物理和化学过程,到目前为止已有多篇

文献对其进行了讨论<sup>[7-10, 17]</sup>.在 HL-2A 上的超声分子束实验中,发现分子束注入深度不仅与气源的温度和压强有关,还与注入孔的结构、等离子体参数等因素有关.本文首先分析了不同等离子体参数和不同分子源气压下超声分子束注入深度的变化,总结

出分子束注入深度的经验定标律公式. 本文还对低温气源(液氮温度)分子束注入过程中观察到的团簇现象进行了分析, 当分子束注入出现团簇时, 等离子体的反应要强烈得多, 注入深度更深、加料效果更加明显. 值得一提的是, 文中得到的分子束注入经验定标律公式是在室温气源分子束实验中做出的总结, 它没有考虑气体源的温度变化, 也没有考虑团簇对注入深度的影响. 因此, 本文的经验定标律公式只适用于室温气源的分子束注入. 在形成团簇后, 上述经验定标律公式需做修正.

超声分子束是一束高速定向的气体流, 它与冰冻弹丸注入有较大的区别. 当分子束注入形成团簇后, 分子束注入的穿透和消融与弹丸注入有相似之

处. 在分子束注入机制的研究中, 提出了一些分子束注入的屏蔽模型, 虽然这些模型的出发点不同, 但它们具有相似性. 分子束团簇的形成与屏蔽层的形成有密切关系, 当分子束流外层形成带电屏蔽层后, 等离子体对分子束的离解作用减弱, 注入深度会更深. 根据室温下分子束注入的经验定标律, 如果提高等离子体的电子温度和电子密度, 分子束很难注入到等离子体中去, 但在出现团簇的分子束注入实验中观察到分子束注入深度要明显深于前述的经验定标深度, 甚至在室温气体分子束实验中也观察到中空分布的电子温度分布<sup>[1,7]</sup>, 这些现象似乎与团簇形成有关. 综上所述, 当分子束注入形成团簇后, 更有利于分子束穿透.

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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 :IAEA)
- [4] Yao L H, Baldzuhn J 2003 *Plasma Sci. Techn.* **5** 1933
- [5] 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, Semichenkov I, Veselova I, Wolfrum E, ASDEX Upgrade Team 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** 1495
- [6] Shi Z B, Ding X T, Yao L H, Liu Z T, Chen C Y, Yang Q W, Feng B B, Zhou Y, Yan L W, Liu Y 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** 2019
- [7] 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]
- [8] Jiao Y M, Zhou Y, Yao L H, Dong J Q 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** 2001
- [9] 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
- [10] Jiao Y M, Zhou Y, Deng Z C, Ding X T, Liu Y, Wang E Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1600
- [11] Yao L H, Yuan B S, Feng B B, Cheng C Y, Hong W Y, Li Y L 2007 *Chin. Phys.* **16** 200
- [12] Dong J F, Tang N Y, Li W, Luo J L, Liu Y, Xiao Z G, Yao L H, Feng B B, Li B, Qin Y W 2002 *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** 371
- [13] Shi B R 2001 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **21** 200 (in Chinese) [石秉仁 2001 核聚变与等离子体物理 **21** 200]
- [14] Song X M, Sugie T, Yoshino R 2003 *J. Plasma Fusion Res.* **76** 282
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Sun H J, Duan X R, Li W, Yao L H, Lu J, Xiao W W, Shi Z B, Ding X T 2006 33rd EPS Conference on Plasma Physics (Roma : European Physical Society)
- [18] Cardozo N J L 1995 *Plasma Phys. Control. Fusion* **37** 799
- [19] Liu B C, Zhu P P, Li Z H, Ni G Q, Xu Z Z 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 659
- [20] Milora S L, Lengyel L L, Mertens V 1995 *Nucl. Fusion* **35** 657

# Experimental study of injection depth and fuelling effects during supersonic molecular beam injection on the HL-2A tokamak<sup>\*</sup>

Shi Zhong-Bing<sup>†</sup> Yao Liang-Hua Ding Xuan-Tong Duan Xu-Ru Feng Bei-Bin Liu Ze-Tian

Xiao Wei-Wen Sun Hong-Juan Li Xu Li Wei Chen Cheng-Yuan Jiao Yi-Ming

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

( Received 3 November 2006 ; revised manuscript received 13 April 2007 )

## Abstract

The fuelling efficiency and injection depth are the fundamental problems of supersonic molecular beam fuelling. In the recent supersonic molecular beam injection ( SMBI ) experiments , the injection depths of SMBI have been found mainly dependent on the background electron density and temperature , the source gas pressure and temperature. The empirical scaling of SMBI depth was obtained at room temperature. Hydrogen clusters formed in the beam have been observed in the low temperature ( source gas at liquid nitrogen temperature ) SMBI experiments. It resulted in injection depth greater than 30 cm. Comparing the relationships between injection depths , plasma background parameters and molecular source temperature , the cluster formation phenomena during low temperature MBI are analyzed.

**Keywords** : supersonic molecular beam injection , injection depth , fuelling efficiency , cluster

**PACC** : 5240K , 7430C , 3640

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10475024 , 10675043 ).

<sup>†</sup> E-mail : shizb@swip.ac.cn