

HL-2A 托卡马克送气成像研究^{*}

郑银甲[†] 黄 渊 冯 震 施 乐 崔成和 王明旭 徐红兵

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

(2005 年 9 月 2 日收到, 2005 年 11 月 29 日收到修改稿)

送气成像(gas puff imaging, GPI)是一种重要的研究边缘辐射诊断手段. 分析了送气(gas puffing, GP)的原子分子过程, 指出气体辐射的主要成分是 $H\alpha$ 线, 出现在边缘区域, 并给出其强度和位置的表达式. 介绍 HL-2A 托卡马克上 GPI 成像系统的改进和实验布置. 从成像的角度获得了 GP 实验中氢气在等离子体空间的辐射图形, 观察结果证实上述分析. 在放电开始阶段, 氢原子可以穿越待建立的完全等离子体区并形成长条形的辐射亮区. 一般的 GP 加料中, CCD 图片与控制信号, 以及其他诊断结果相符合. 在等离子体边缘区域强场侧(HFS)和弱场侧(LFS)都观察到很强的 $H\alpha$ 线辐射.

关键词: 送气, CCD 成像, $H\alpha$ 线

PACC: 5270, 5270K

1. 引 言

托卡马克的燃料补充是很重要的研究内容. 常规的四种加料方式包括: 1) 弹丸注入; 2) 中性束注入; 3) 补充送气; 4) 超声分子束注入. 方式 4 可以作为其他三种方式的补充.

弹丸和中性束注入可以进入等离子体深层区域, 甚至芯部. 最近的实验表明: 弹丸从强场区注入比从弱场区注入其加料效率有效得多, 可导致芯部的质量存积^[1, 2].

然而补充送气(gas puffing, GP)仍然是托卡马克常规使用最频繁的一种加料方式. 边缘主动送气(包括脉冲喷气, 或按特定要求反馈喷气)和被动送气(器壁再循环)使粒子密度剖面分布较为平坦. 对器壁的碳化处理后则可获得较陡的密度分布.

来源于补充送气和分子束气体的线辐射(主要是 $H\alpha$ 线)在实验中具有重要意义, 边缘辐射提供了许多感兴趣的信息, 因而对其研究和诊断已引起重视.

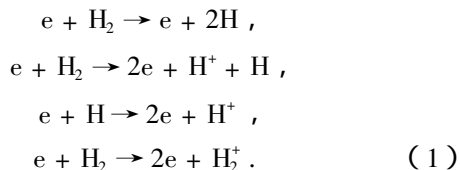
送气成像(gas puff imaging, GPI)是研究边缘辐射的主要诊断手段之一, 已列入 ITPA-IDD(International Tokamak Physics Activity International Diagnostics Database)的诊断数据库, 涉及许多研究内容.

目前国外已经在发展 GPI 技术, 例如在 TFTR 和 ASDEX 上研究边缘的密度扰动, Alcator C-Mod 上脉冲超声氢束的边缘参数诊断测量, 在 NSTX(National Spherical torus Experiment)上的高速照相, 以及在 D-III-D 上使用切向观察的 CID(charge-injected device)相机研究主真空室和偏滤器气体再循环和粒子数沉积问题等^[3-7].

本文对等离子体中送入氢气的原子分子过程进行讨论, 指出 GP 的 $H\alpha$ 线辐射出现在边缘区域, 而其强度由氢原子密度决定. 介绍可见光 GPI 成像系统的改进和实验布置, 报道在 HL-2A 托卡马克上进行的送气建立等离子体和加料实验的观测结果.

2. 氢气注入等离子体后的 $H\alpha$ 线辐射

当氢气进入等离子体边缘, 热电子与氢分子原子的主要反应如下:



在大量的气体中, 首先每个氢分子被分离成两个弗兰克-戈登(FC)原子(弗兰克-戈登能量约 2—3 eV).

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 30375020)资助的课题.

[†] E-mail: zhengyj@swip.ac.cn

在分子的振动转换中电子的能态跳跃时间约 10^{-16} s, 故这一过程将很快完成. 补充气体进入等离子体表现为大量氢原子的行为.

GP 的注入物为光谱纯级氢(氢粒子含量极高, 纯度 99.9999% 以上). 在补充送气过程中, 边缘区域辐射中最突出和主要的线辐射是巴耳末线系中的 $H\alpha$ 线——氢原子在主量子数 $n=3$ 和 2 之间跃迁所发出的谱线.

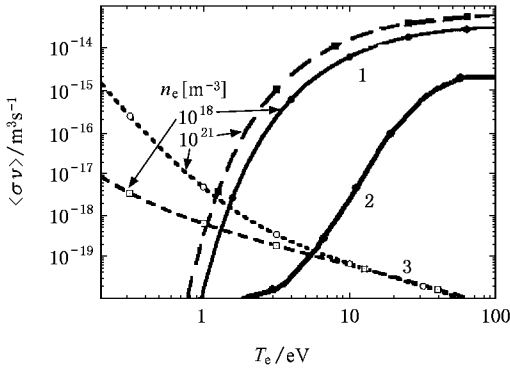


图 1 中性氢粒子的 1) 电离, 2) 激发和 3) 复合率系数与等离子体电子温度和密度的依赖关系

气体分子受到电子的碰撞过程, 包括碰撞激发, 碰撞分离, 碰撞电离和复合. 在图 1 中, $H\alpha$ 线辐射对应激发过程. 电离过程与此线辐射密切相关, 因为氢原子一旦电离后就意味着 $H\alpha$ 辐射的结束. 复合过程与氢原子密度相联系, 但复合辐射效应在边缘区影响不大.

氢中性原子可以不受任何阻碍到达真空室壁, 经过反射, 再返回等离子体, 形成再循环. 再循环与器壁状态有关.

气体通量的径向衰减长度由渡越时间 τ_i 和粒子速度的乘积确定. τ_i 可以表示为

$$\tau_i = \frac{1}{n_e v \sigma_i} \quad (2)$$

其中 n_e 是气体入射方向的等离子体电子密度, 电离率系数 $v \sigma_i$ 是电离截面 σ_i 对电子的麦克斯韦速度分布积分平均的结果. τ_i 既是对单粒子而言, 也是对整个气体而言, 一般在 10^{-4} — 10^{-5} s 级.

常规的 GP 由于其速度较低和速度展宽, 粒子流扩散角度大等因素, 气体很难进入到等离子体更深的区域, 穿透深度一般为 1—3 cm. 这就是在加料中经常提到的所谓“气体束阻塞 (beam blocking)”现象^[8].

以下对激发和电离过程对 $H\alpha$ 线辐射的影响进

行分析. 单位时间单位体积气体氢粒子的激发率(激活率)可以表示为

$$\phi(r) = n_e(r) n_0(r) v \sigma_e(r), \quad (3)$$

式中 $n_e(r)$ 等离子体电子密度, $n_0(r)$ 是气体局部的中性氢原子密度. $v \sigma_e$ 是激发率系数, 在低密度 n_e (10^{13} cm $^{-3}$ 以下) 条件下与电子温度 T_e 剖面有关, 因而也是径向位置 r 的函数. $\phi(r)$ 表示每秒每立方米体积中与等离子体半径有关的激发原子数.

氢粒子的激发与电离过程紧密相连, 而且仅发生在离化时间(即渡越时间 τ_i) 内. 这样单位体积内总的激发粒子数 dN/dv 可以表示为

$$dN/dv = \phi(r) \tau_i = n_0(r) \frac{v \sigma_e}{v \sigma_i}, \quad (4)$$

dN/dv 与激发率和离化率系数比率有关. 根据玻恩-库仑分析的关于原子某一能级的激发与电离率系数的近似表达式

$$v \sigma_i = 10^{-8} \frac{1}{2l+1} \left| \frac{R_y}{E_0} \right|^{3/2} \exp\left(-\frac{E_0}{T_e}\right) Q_i G_i \left(\frac{E_0}{T_e}\right),$$

$$v \sigma_e = 10^{-8} \frac{1}{2l+1} \left| \frac{R_y}{E_0 - E_1} \right|^{3/2} \left(\frac{E_1}{E_0}\right)^{3/2} \times \exp\left(-\frac{\Delta E}{T_e}\right) Q_k G \left(\frac{\Delta E}{T_e}\right), \quad (5)$$

式中 R_y 是里德伯常数, E_0 是基态电离能量, E_1 是激发态电离能量, 且 $\Delta E = E_0 - E_1$, Q_i 和 Q_k 是取决于电子壳层量子数的参数^[9].

为了得到激发与电离率系数比与电子温度 T_e 之间的关系, 在忽略(4)式中岗特因子 G 和 G_i 的微弱变化条件下, 用平均激发能量 ΔE 乘激发数, 经过简单计算, 得到近似关系式

$$\frac{v \sigma_e}{v \sigma_i} \propto \exp\left(\frac{E_1}{T_e}\right) \left(\frac{E_1}{E_0}\right) \left(\frac{E_1}{\Delta E}\right)^{1/2}, \quad (6)$$

或者

$$dN/dv = \phi(r) \tau_i \propto n_0(r) \exp\left(\frac{E_1}{T_e}\right) \left(\frac{E_1}{E_0}\right) \left(\frac{E_1}{\Delta E}\right)^{1/2}. \quad (7)$$

可以看出 $\frac{v \sigma_e}{v \sigma_i}$ 与指数项中的 T_e 成反比, 即

dN/dv 大体上由实际 T_e 剖面所决定. 沿径向方向随着内部温度增加, $H\alpha$ 辐射很快地下降. 换句话说, $H\alpha$ 线辐射区的位置主要集中在等离子体边缘区域.

假定 GP 粒子的辐射主要是 $H\alpha$ 线, 图 2 表示在托卡马克中 $H\alpha$ 辐射强度与等离子体 T_e 和 n_e 的依赖关系(引自文献[10]). 图中 $H\alpha$ 线强度变化在 T_e

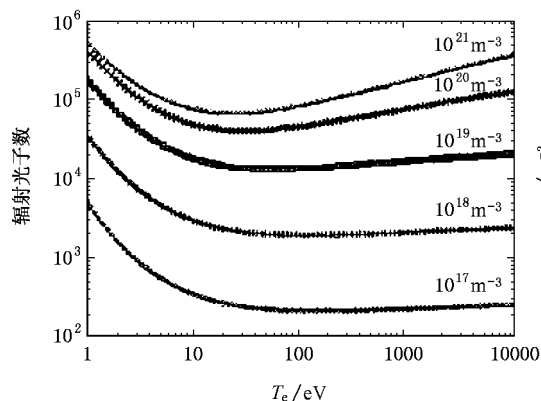


图 2 H_{α} 线辐射的光子数与等离子体电子温度和电子密度的关系

的 10—20 eV 附近有一个分界点, 在 10—20 eV 以内的边缘区域, T_e 愈小则辐射愈强, 在高温区域强度则趋于平坦, 而 H_{α} 线强度总是随 $n_e(r)$ 增加而升高^[10].

关系式 (3) 是 H_{α} 线强度的一个量度, 在气体电离后初始阶段, 强度取决于 n_0 , 即与气体压强成正比. 换句话说, 其强度与送气量有密切关系. 由于再循环, 器壁吸附的原子缓慢返回维持等离子体柱的粒子平衡.

关系式 (7) 是 H_{α} 辐射位置的一个量度. 如果温度剖面平坦, H_{α} 辐射将占据等离子体边沿较宽的区域. 如果 T_e 剖面陡峭, H_{α} 辐射将体现在很窄的区域边沿. 在 10—20 eV 以内推导式 (7) 与图 2 是一致的.

CCD 视场的 H_{α} 辐射观测可给出等离子体再循环和辐射损失一个总体估计, 特别在 CCD 相机的 H_{α} 辐射绝对量标定后, 可用于氢粒子通量的确定. 在忽略杂质的情况下, 根据图 2, H_{α} 强度在宽的 T_e 范围 (大于 10 eV) 内能用于直接测量电离事件数目, 也就是粒子通量^[10, 11].

3. 实验布置和成像系统的改进

GPI 的实验的布置见图 3, 气体沿着装置中平面从西北方向 (图中 GP) 注入等离子体. CCD 相机位置与送气口靠近, 且相机的视场范围在气体注入区域内. GP 一方面是高密度放电的加料方式, 另一方面也为等离子体产生提供初始气体. HL-2A 依靠欧姆变压器击穿, 尚无其他加速放电的预电离措施.

在图 3 中, 使用了 HCN 激光干涉仪测量线平均 n_e , 朗缪尔探针测量边缘 T_e 和 n_e , 可见光发射探测

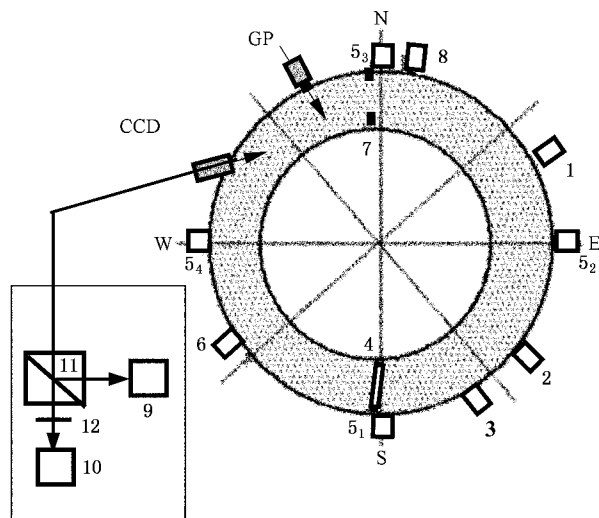


图 3 实验布置和诊断的位置图 (GP 为补充送气位置; CCD 为 GPI 成像系统位置. 1 为 HCN 激光干涉仪; 2 为位于上偏滤器的测量气体压力的快视; 3 为位于下偏滤器的朗缪尔探针; 4 为固定孔栏; 5 为可见光探测器 (S_1, S_2, S_3, S_4); 6 为位于主真空室的朗缪尔探针; 7 为活动孔栏; 8 为真空 VUV 谱仪; 9 为 SCC-731 型 CCD 相机; 10 为 UC-610 型 CCD 相机; 11 为光分束器; 12 为干涉滤光片)

阵列监视和测量 H_{α} 和其他线辐射, 真空 VUV 谱仪测量杂质谱线.

装置南侧右边位于上偏滤器的快速电离规 (fast ionization gauge, FIG) 在强磁场下具有较好的抗干扰能力, 监视和测量真空室中性气体压强 (图 4 中 ph_2), 显示氢原子密度随时间的变化. 测量范围为 10^{-4} Pa—20 Pa, FIG 在此范围内收集极离子流与发射电子流之比与气压保持良好线性关系. 响应时间 4 ms.

图 3 中送气系统 GP 处中平面斜上方 1.3 m 位置真空室内的电离规 (图 3 中未画出) 监视送气压强 (见图 4 中 gas). 送气口在中平面上, 实际的送气量不能由 gas 简单得到.

GPI 成像系统包括 CCD 相机 (带 H_{α} 光学滤光片), 观察和收集光学组件, 视频采集卡, 计算机以及 30 多米长的视频传输线. 用一系列照片把送气过程的情景显示出来^[12].

视频图像由 CCD 纪录, 由计算机采集, 存储, 控制和处理, 并以两种方式输出: 图像在控制大厅的大屏幕上实时显示, 同时数据和图像直接进入计算机存储服务器, 以 BMP 文件形式作永久纪录^[13].

系统在原有的基础上进行了改进, 采用了光分束器 (见图 3) 把来自等离子体的气体辐射分为两

路,一路到原有的彩色摄像机,一路到新添的高速数字 CCD 相机. 这样构成两套系统,一套提供实时放

电监控. 另一套加上光学滤光片,可进行相关物理问题的研究.

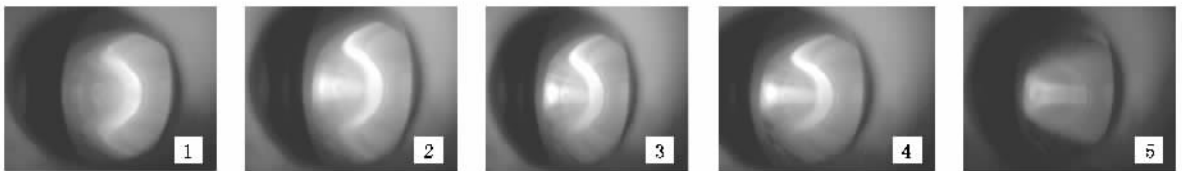
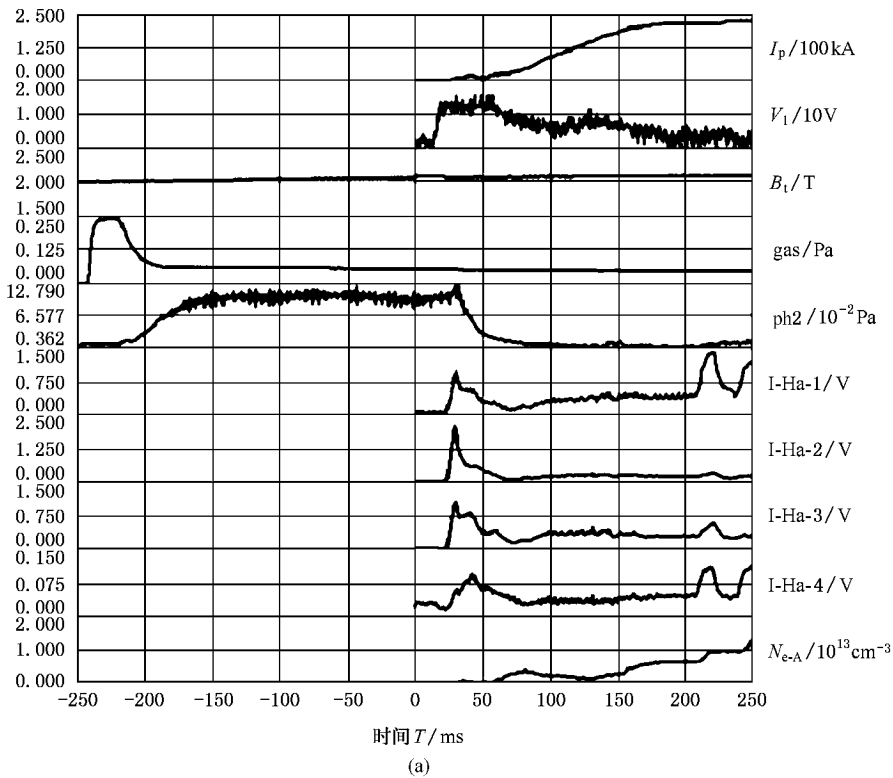


图4 2987次放电等离子体建立的波形图和 CCD 图片 (a)HL-2A 等离子体建立期间放电参数随时间的变化(1为等离子体电流 I_p , 2为环电压 V_1 , 3为纵向磁场 B_t , 4为监视的送气气压 gas , 5为 FIG 测量的真空室气压 $ph2$, 6为 $H\alpha$ 线辐射的监视信号 $I-H\alpha-1$, $I-H\alpha-2$, $I-H\alpha-3$, $I-H\alpha-4$, 7为线平均电子密度 N_{e-A}), (b) 相应的 CCD 图片(1为 9.3—18.6 ms, 2为 18.6—27.9 ms, 3为 27.9—37.2 ms, 4为 37.2—46.5 ms, 5为 55.8—65.1 ms. 每幅图片曝光时间 1 ms, 图片分辨 659×494 pixels, 4.2 mm/pixel, 下同)

新添的 CCD 为 UC-610 Uniq Vision 型(美国), 采集频率为 110 帧/s, 其曝光时间可以在 $1/110$ — $1/62000$ s 之间调节. 分辨率为 659×494 像素点, 提供极向方向较大的覆盖面, 用于追踪以时间为函数的二维 $H\alpha$ 辐射图像. 如加以改进, 可以发展到等离子体边缘扰动和刮削层传输的研究.

当气体注入后, 由于与等离子体的电子碰撞, 气流中的粒子被激发, 分离, 电离, 甚至再复合, 这些原子分子过程对辐射功率和强度作出贡献. $H\alpha$ 线空间位置取决于 T_e 剖面. 边缘温度相对较低, 送气气体的冷却辐射层将会限制在边缘一小部分体积内.

4. 实验结果

HL-2A 装置是带有偏滤器的托卡马克 (大半径 R 为 165 cm, 小半径 a 为 38—45 cm), 已在新区建成, 其主要部件(磁场线圈和真空室)来源于德国 ASDEX 装置.

HL-2A 装置从 2002 年运行至今已接近高参数范围. 在偏滤器位形和孔栏位形条件下, 等离子体电流 I_p 达到 320 kA, 坪区存在时间 1058 ms. 纵向磁场 2—2T, 线平均中心电子密度 n_e 达到 $4.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 是在 GP 加料条件下达到的^[14,15].

在 GPI 系统改进后测量中,两套观察的 GP 辐射图形形状没有明显改变,证明了送气的辐射主要是 $H\alpha$ 线.

4.1. 建立等离子体的送气成像

等离子体的形成需要 GP 提供少量本底气体.图 4(a)表示了第 2987 次放电等离子体建立期间的实验曲线.其中 I_p 建立后的前 200 ms 为孔栏位形,之后为偏滤器位形.气体击穿在 250 ms GP 之后形成托卡马克等离子体环,本次放电并未选择 GP 峰值击穿.

I_p 建立前这段时间内,监视的供气气压(gas)很快衰减,注入的大部分氢将结合在器壁上.由于 gas 与 $ph2$ 的测量位置相距最远(图 3 中,GP 和 2),使两者平顶峰值出现几十毫秒延迟. FIG 测量的真空室气压表明:中性氢气压($ph2$)由零开始增加,逐渐达到饱和.

I_p 形成后,伴随着气体的击穿,出现了监视的 $H\alpha$ 信号和 I_p 的增加.气体电离后其中性成分减少, $ph2$ 信号很快降低.由图 4(a)可以看出 $H\alpha$ 辐射强度大体上与初始气体压强成正比而减小,这与(3)式是一致的.

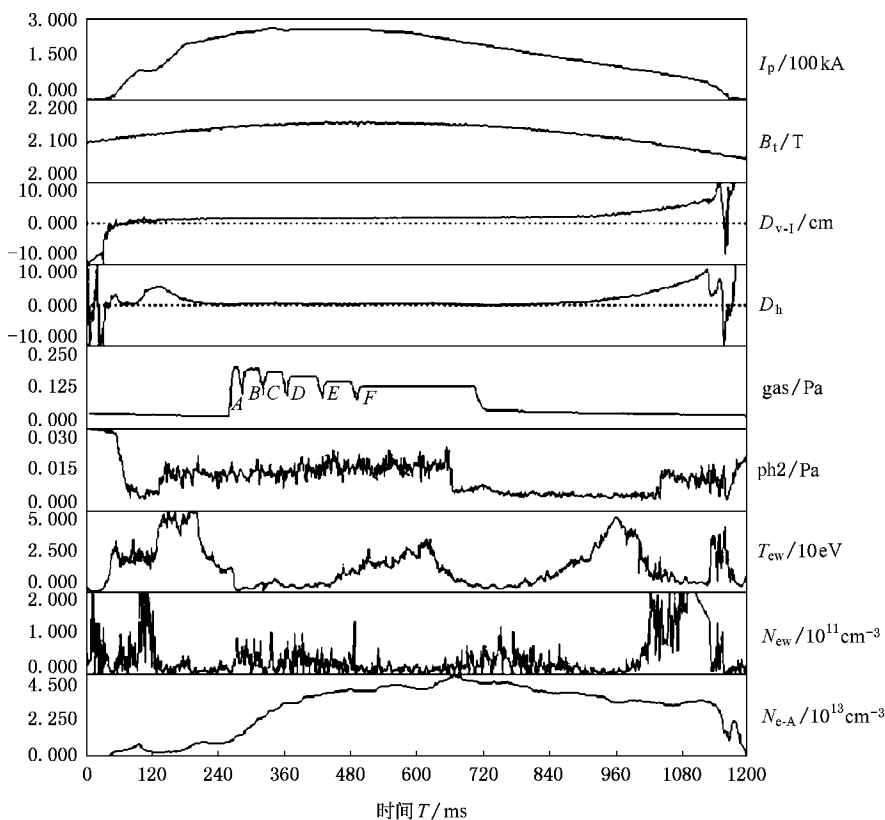


图 5 3039 次放电等离子体参数随时间的变化(1 为等离子体电流 I_p , 2 为纵向磁场 B_t , 3 为等离子体垂直和水平位移 D_{v-1} , D_h , 4 为监视的送气气压 gas , 5 为快速电离规测量的真空室气压 $ph2$, 6 为等离子体边缘电子温度 T_{ew} , 7 为等离子体边缘电子密度 N_{ew} , 8 为中心平均线电子密度 N_{e-A} . 图中 A, B, C, D, E, F 分别表示 6 次脉冲送气)

图 4(b)清晰表示了等离子体的形成后的演变过程.可见光成像系统每隔 9.3 ms 采集一幅图片.在 9.3 ms 中,前一毫秒为曝光时间.不同时刻的 CCD 图片也相应于在图 4(a)中气体进入的过程.

送气口位于左面(在图 4(b)(3)或图 6(a)(2)中亮点附近), CCD 不能直接看到送气口.气体在图中由左至右进入真空室,击穿电离发生在真空室右侧

孔栏区域(见图 4(b)(1),亮区为孔栏),即所谓尖端放电区域.

在 0—50 ms 的起始段 I_p 很小,气体开始可以直接由左至右注入即将建立的等离子体柱区,甚至达到右侧孔栏区域形成长条亮区(图 4(b)(2)).随着 I_p 建立,大量进入的粒子受 I_p 中电子碰撞激发产生了较强的 $H\alpha$ 线辐射,见图 4(b)(3)(4)中亮点.

H α 线辐射由等离子体中中性氢原子产生,其强度取决于其密度.注意到 I_p 建立后其密度(FIG 测量)迅速减少,造成放电的 50 多毫秒后 H α 线辐射减少,因而相应 CCD 图片亮度减小(图 4(b) & (5)).

第 2987 次放电进行了超声分子束注入试验,图 4(a) 曲线中 200 ms 后产生的 H α 线辐射信号是由超声分子束注入引起的.

4.2. 提高密度的补充送气成像

为了在放电过程中主动控制电子密度 n_e 水平,

常用 GP 以维持电子密度 n_e 的稳定,甚至加料以增大 n_e . 器壁的储氢库将参与维持等离子体柱的粒子平衡.

HL-2A 在提高电子密度的 GP 实验中取得了较好的结果,3039 次孔栏位形放电是一个典型的例子.图 5 表示等离子体参数和诊断结果,其中 I_p 超过 260 kA, B_T 2.1 T, 等离子体存在时间为 1200 ms, 最大中心线平均电子密度上升到 $4.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

每一次当脉冲系列一个接一个的注入时,在 CCD 图片上辐射的过程周期性的重复,在出现时间(图 5

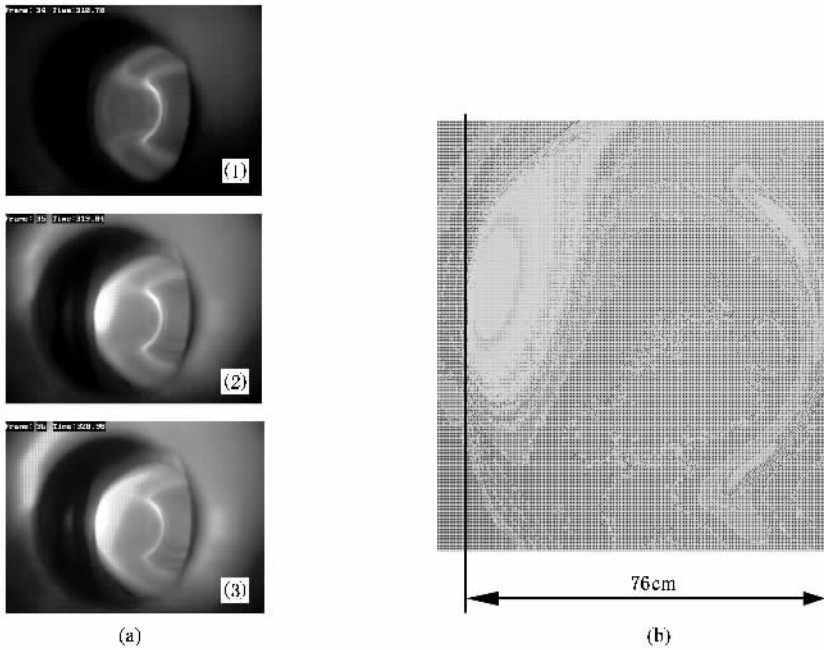


图 6 3039 次放电补充送气的 CCD 图片 (a) 补充送气第一个脉冲的 CCD 图片(送气期间图片明显变红).(b) 图(a) & (3) 数据的等值面图(扣出(1)的本底数据) 两幅图间隔 9.3 ms, 曝光时间: 照片开始纪录的前 1 ms)

中 GP 信号 A, B, C, D, E, F) 和周期两方面, CCD 的记录与送入氢气的电控制信号相符合, 见表 1.

表 1 送气脉冲宽度和出现时间

气体脉冲序号	脉冲宽度 Δt_1 (由送气曲线)	脉冲宽度 Δt_2 (由 CCD 图片)	备注
1. A	22	20	
2. B	39	37	
3. C	42	46	Δt_1 指 gas 曲线中两脉冲起点间隔时间; Δt_2 指照片幅数时间并结合曝光时刻估计的图片形状时间
4. D	64	65	
5. E	64	65	
6. F	232	233	

GPI 成像系统观察结果与其他放电参数的测量一致.在 GP 注入过程中,冷却的气流使边缘电子温

度 T_{ew} 迅速下降,而电子密度 N_{ew} 上升.

图 6 为 3039 次放电的 CCD 图片和等值面图,这

里只取了图 5 中第一个脉冲 A 作为例子(其余脉冲省略).图 6(a)为 GPI 的 CCD 图片 (b)为 CCD 数据

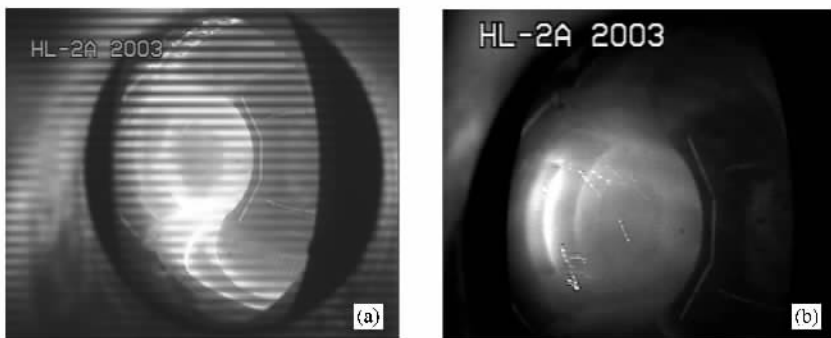


图 7 等离子体破裂和杂质溅射时的 CCD 图片 (a)等离子体破裂 (b)杂质溅射

第一幅图送气脉冲尚未到达,第二,三幅图是脉冲上升,平顶及下降段.

在补充送气过程中,CCD 图片上 $H\alpha$ 辐射的强度和位置反映 GP 的氢原子在等离子体中的运动过程.可以看出送气脉冲到达后,图片颜色明显变红,主要是氢原子受电子碰撞激发而产生的 $H\alpha$ 辐射.随着送气过程的延续,产生的弗兰克-戈登原子越来越多,线辐射增强.

从图片上可以看到:气体在真空室内壁沿大环方向膨胀和扩散,因为使气体原子激发的 I_p 电流中的电子和离子是沿着局部磁场方向运动的.由于碰撞转换,中性成分($H\alpha$ 辐射)明显地被电子和离子所拖动,沿着磁力线运动.

同时在极向(径向)方向,气体的中性氢原子以及电离的粒子以横越磁场的扩散方式进行传输.与 4.1 节不同,气体不再从左至右直接穿透,而只能进入较小范围,这也是这种加料不能深入芯部的困难所在.

图 6(b)表示了 GP 脉冲最强时的气体传播过程.可以看出气体从送气口(图中左面)往等离子体边缘和内部膨胀和扩散.在 LFS(弱场侧,图中左面)和 HFS(强场侧,图中右面)两方面观察到很强的 $H\alpha$ 辐射,都有氢气成分.由于气源在左面,HFS 侧的出现的氢粒子是通过等离子体边缘扩散过来的.

另外,图中标出的等离子体小半径($r = (1/2) \times 76 = 38$ (cm))与等离子体边界识别的模拟研究一致^[16].

根据 CCD 相机视场位置,在 LFS 侧边沿和其他区域有重叠.如果换一个视场角度观察会获得较好的物理图像.

扣除本底后 $H\alpha$ 辐射等值面图.

在 20ms 左右时间范围内共出现 3 幅图.其中

与边缘电子密度上升的同时,平均中心线的密度 $n(0)$ 开始明显上升.总体上, I_p 平顶期密度从约 $0.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 增加到最大的 $4.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

由于 $n(0)$ 是由 HCN 激光干涉仪在中平面上方 3.5 cm 处测量的.GP 的加料使 n_0 增加,主要是边缘的电子密度加料,从而导致平均线电子密度增加.

4.3. 等离子体破裂和杂质溅射

等离子体破裂时辐射明显增强,表现在整个 CCD 图片上是明亮的辐射图形.

放电破裂时我们看到与 4.1 相反的情况,此时 I_p 很快上升,又突然降低,真空室中性气体压强则突然上升.例如 1901 次放电,FIG 测量的气体压强在 3 ms 内由 $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 上升至 $1.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ (峰值的 90%) 并在 4 ms 达到峰值^[17].这表明 I_p 破裂时中性氢原子密度变化非常快,从而使 CCD 图片亮度增强.(图 7(a),FIG 测量可参阅文献[17]).

CCD 照片(图 7(b))上也可以观察到杂质溅射现象.一般是许多斑点,或大或小,无规运行,形如流星雨.杂质在真空室内溅出后形成一道轨迹弧线,如果改善拍摄的时间分辨,有可能测量杂质粒子在等离子体中的运行速度.

5. 讨论和结论

在 HL-2A GP 实验中利用光学成像技术获得送气过程的辐射图形.在建立等离子体的 GP 中,气体可以穿越等离子体柱并形成亮点.一般的补充 GP 中,CCD 图片显示的辐射过程与 GP 控制信号和其他放电参数相符合.

分析了氢气进入等离子体的原子分子过程,其辐射主要为 $H\alpha$ 线。 $H\alpha$ 线成像技术可以追踪 GP 甚至超声分子束加料气体在等离子体中的行为^[18,19]。

(3) 式确定 $H\alpha$ 线的强度,即与中性原子密度和电子密度成正比。(7) 式表明辐射位置集中在等离子体边缘区域,主要由温度剖面决定。

GPI 诊断有较大的发展空间,例如等离子体小半径 r 的确定, $H\alpha$ 线的绝对测量用于测定氢粒子通量,边缘扰动和刮削层传输的研究,改进 CCD 运行参数,例如提高 CCD 的时间分辨(高速),国外相机帧

幅率达到上千赫兹,曝光时间进入微秒级,和空间分辨(增加像素点)可以得到更细致的物理结果。

在可见光谱区域等离子体是光薄性的,对辐射区域的观测通过真空室窗口,任何视线的测量都涉及线积分,需要对 CCD 数据反演获取强度的空间截面。

在进一步研究中,还有不少待解决的问题。

HL-2A 运行组运行托卡马克装置,诊断组提供放电参数,作者在此表示衷心感谢。

- [1] Milora S L ,Houlberg W A ,Lengyel L L *et al* 1995 *Nucl. Fusion* **35** 657
- [2] Lang P T ,Büchl K ,Kaufmann M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 1487
- [3] Zweben S J ,Maqueda R J ,Stotler D P *et al* 2004 *Nucl. Fusion* **44** 134
- [4] Maqueda R ,Wurden G 1999 *Nucl. Fusion* **39** 629
- [5] Endler M ,Niedermeier H ,Giannone L *et al* 1995 *Nucl. Fusion* **35** 1307
- [6] Terry J L in Proceedings 14th International Conference on Plasma—Surface Interactions in Controlled Fusion Devices ,(Rosenheim , Germany)2000
- [7] Groth M ,Petrie T W ,Porter G D *et al* 2003 “ Investigation of main-chamber and divertor recycling in D III -D using tangentially viewing CID cameras ” ,30th EPS conference on Plasma Phys. 2003 ,St Petersburg ,Russia
- [8] D. Reiter Neutral gas transport in fusion devices : Atomic and surface data aspects in atomic and plasma material interaction processes in controlled thermonuclear fusion pages 243 ~ 246 , Elsevier Science Publishers B. V. ,1993
- [9] Sobelman I I ,Vainshtein L A ,Yukov E A “ Excitation of Atoms and Broadening of Spectral Lines ” , Springer Verlag Berlin (1981)
- [10] Ralf. Schneider “ Plasma edge physics for tokamaks ” Habilitation University Greifswald (2001) , IPP-Peport12/1 and <http://www.ipp.mpg.de/eng/for/bereiche/stellarator/for-ber-ste-akt.html>
- [11] John Wesson Tokamaks , Clarendon press , Oxford , 1997
- [12] Zheng Y J ,Feng Z ,Luo C W *et al* 2004 *Nucl. Fusion and Plasma Phys.* **24** 259 (in Chinese) [郑银甲、冯震、罗萃文等 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 259]
- [13] Zheng Y J ,Feng Z ,Luo C W *et al* 2004 31th EPS conference on Plasma Phys. 2004ECA Vol. 28B ,p-5. 137 , UK , London
- [14] Gao Q D ,Budny R V ,Zhang J *et al* 2000 *Nucl. Fusion* **40** 1897
- [15] HL-2A team (presented by Yong LIU) “ Recent advances in the HL-2A Tokamak Experiments ” , 20th IAEA Fusion Energy Conference , 1-6 Nov. 2004 , Vilamoura , Portugal
- [16] Yuan B S ,Liu L ,Li F Z *et al* 2004 *Nucl. Fusion and Plasma Phys.* **24** 81 (in Chinese) [袁保山、刘莉、李芳著等 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 81]
- [17] Wang M X ,Li B ,Yang Z G *et al* 2004 *Nucl. Fusion and Plasma Phys.* **24** 266 (in Chinese) [王明旭、李波、杨志刚等 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 266]
- [18] Yao L H ,Feng B B ,Feng Z *et al* 2002 *Acta. Phys. Sin.* **51** 596 (in Chinese) [姚良骅、冯北滨、冯震等 2002 物理学报 **51** 596]
- [19] Lin J Q ,Zhang J ,Li Y J *et al* 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 457 (in Chinese) [林景全、张杰、李英骏等 2001 物理学报 **50** 457]

Investigation of gas puff imaging on HL-2A tokamak^{*}

Zheng Yin-Jia[†] Huang Yuan Feng Zhen Shi Le Cui Cheng-He
Wang Ming-Xu Xu Hong-Bing

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

(Received 2 September 2005; revised manuscript received 29 November 2005)

Abstract

GPI (gas puff imaging) is one of the important diagnostics method for investigation of the radiation in the edge region of plasma. In this paper, atomic and molecular processes during GP (gas puff) passage are analyzed. The main radiation emitting from the gas is identified as the $H\alpha$ line, appearing on the plasma edge region, and the expressions of its intensity and location are given. As viewed from imaging angle, space radiation photograph of hydrogen gas during the GP was obtained experimentally. Improvements of the imaging system and GP experiment arrangement on the HL-2A tokamak are introduced. The observation results confirm the above analysis. In the beginning stage of plasma, the GP hydrogen atoms can pass through the region where the plasma column is to be set up and the bright strip region is formed. In the general GP fuelling, CCD photos are in accordance with the control signals, and other diagnostic results. The strong $H\alpha$ emissions in both the HFS and LFS sides of plasma are observed.

Keywords : gas puff, CCD imaging, $H\alpha$ line

PACC : 5270, 5270K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10375020).

[†] E-mail: zhengyj@swip.ac.cn