

⑥ 95-100

第19卷 第2期

核聚变与等离子体物理

Vol. 19, No. 2

1999年 6月

Nuclear Fusion and Plasma Physics

June 1999

# HT-6M 托卡马克边界粒子循环

徐 伟

(广州师范学院物理系, 广州 510400)

万宝年

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

TL63/24

利用光学多道分析仪(OSMA)系统进行了高分辨率的 H $\alpha$  谱线线型的测量, 从 H $\alpha$  谱线线型直接得出氢原子的能量分布。由能量分布可知, 发生在等离子体边界的原子、分子过程是离子在孔栏表面中性化后的反射, 以及电子碰撞引起的氢分子的激发离解和电离离解。通过高斯拟合, 得出了再循环粒子的入射速度。

关键词 H $\alpha$  谱线线型 能量分布 分子过程 高斯拟合

托卡马克 粒子循环

## 1 引言

大多数托卡马克采用氢或氘做工作气体, 这些工作气体的粒子约束时间仅仅是放电持续时间的几十分之一到十分之一。因此粒子在一次放电中要循环十到几十次。再循环的粒子最终以原子形式进入等离子体, 在等离子体中通过碰撞电离维持电子密度和离子密度, 主导整个等离子体行为<sup>[1]</sup>, 同时电离过程伴随着激发辐射。对氢、氘原子的发射光谱进行分析, 是研究粒子循环、粒子输运行为、边界原子和分子过程的重要手段。

## 2 实验安排

实验安排如图 1 所示。在光纤头 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 上沿竖直方向分别排列着 5 道石英光纤束(每根芯径 30 $\mu$ m), 通过透镜将孔栏上半部表面附近的等离子体的像成于 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 上。D<sub>1</sub> 的观测方向几乎垂直于孔栏的表面, D<sub>2</sub> 观测方向与孔栏的表面的夹角在 45° 左右。光纤头 D<sub>0</sub> 是单道光纤, 作定标用。D<sub>0</sub>、D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 通过 35m 光纤有序地排列在光纤头 D 上, 再通过透镜将 D 的像成于可见光学多道分析仪(OSMA)的单色仪入射狭缝上。OSMA 系统主要由 0.75M 单色仪、ST-130 和 ST-570 控制器、PG10 脉冲发生器、计算机和探头(ICCD)组成。其中单色仪装配三块光栅, 光栅常数分别为 3600mm<sup>-1</sup>、1200mm<sup>-1</sup> 和 300mm<sup>-1</sup>, 对应的探头谱分辨率为 0.0057nm/象素、0.023nm/象素和 0.13nm/象素。实验中我们用的光栅是 1200mm<sup>-1</sup> 的全息光栅。探头是增强型面阵电荷耦合器件(578 象素 $\times$ 384 象素)。

为了避免等离子体旋转对线型的影响, 我们直接通过中心弦对孔栏进行 H $\alpha$  谱线线型分析。HT-6M 孔栏的表面是凸曲面, 因此我们可以忽略反射光的影响。

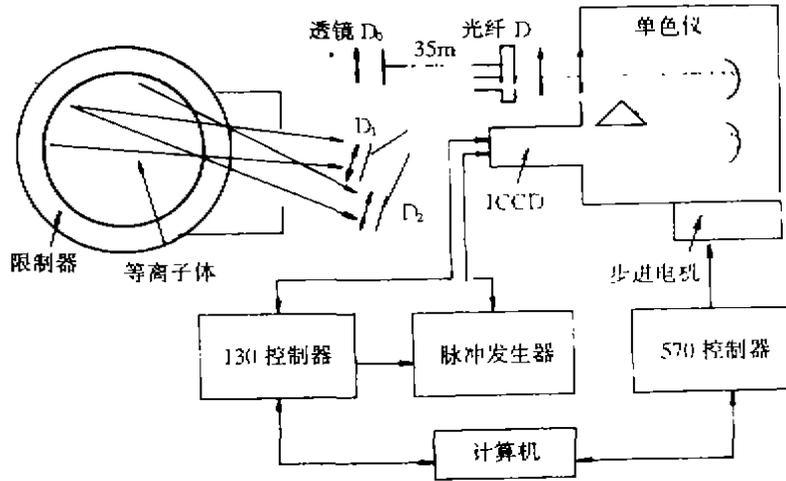


图 1 实验安排

### 3 边界原子分子过程

H $\alpha$  线型主要由仪器函数、观察方向、光源的空间分布、等离子体的分布及原子和分子过程共同决定。仪器函数可以用氦氖激光(632.8nm)测量出,而后用反卷积的方法从 H $\alpha$  谱线线型中将它扣除。在实验中单色仪入射狭缝宽为 5 $\mu$ m,测得仪器展宽约为 0.02nm。对于温度在 10eV 时的 H $\alpha$  谱线,多普勒展宽约为 0.16nm。因此,仪器展宽对线型影响不大。对于处于  $n = 3$  的激发态原子,自发跃迁到  $n = 2$  能级时发射 H $\alpha$  谱线,寿命在微秒量级,而原子本身的辐射是空间均匀的。现在假定探测空间某一小体积元  $dr$  内的中性氢密度为  $n_0$ ,则速度处于  $v + dv$  内的粒子数为:

$$n(v) = n_0 f(v) dv \quad (1)$$

式中  $f(v)$  为速度分布函数。

在日冕模型下,该体积元发射偏离中心波长  $\Delta\lambda = v\lambda_0/c$  的 H $\alpha$  谱线的体发射率为:

$$de = \frac{1}{4\pi} n(v) n_e \langle \sigma v \rangle B dv = \frac{1}{4\pi} n_0 f(v) n_e \langle \sigma v \rangle B dv \quad (2)$$

式中  $n_e$  为该体积元内的电子密度,  $n_0$  为中性氢原子密度,  $\langle \sigma v \rangle$  为激发系数,  $B$  为谱线的分支比。因此,探测器探测的谱线强度分布为:

$$I(v) \propto \int n_0 n_e \langle \sigma v \rangle \int_0^\infty f(v) dv dr \quad (3)$$

$dr$  为探测区体积。又  $E = \frac{1}{2} mv^2$ , 所以  $dv = \frac{\sqrt{2}}{E^{1/2}} dE$ 。同时  $E = \frac{mc^2(\Delta\lambda)^2}{2\lambda_0^2}$ , 代入式(3), 得:

$$I(\Delta\lambda) \propto \int n_0 n_e \langle \sigma v \rangle \int_{E(\Delta\lambda)}^\infty \frac{f(E)}{E^{1/2}} dE dr \quad (4)$$

当电子温度高于 10eV 时, 每电离一个氢原子所辐射的 H<sub>α</sub> 光子数几乎为恒量, 误差小于 10%<sup>[2]</sup>, 因此上式可写成:

$$I(\Delta\lambda) \propto I_0 \int_{E(\Delta\lambda)}^{E(\Delta\lambda)} \frac{f(E)}{E^{1/2}} dE \quad (5)$$

式中  $I_0 = \int n_0 n_e \langle \sigma v \rangle dr$ 。上式可变换成<sup>[3]</sup>:

$$f(E) \propto \frac{dI(\Delta\lambda)}{d\lambda} \quad (6)$$

因此, 在只考虑多普勒效应的前提下, H<sub>α</sub> 谱线的分布实际上就是在观测方向上中性氢原子的速度分布的线积分的结果, 对它求梯度就能得到中性氢原子的能量分布。

图 2a 是 H<sub>α</sub> 谱线线型, 图 2b 是由式(6)算出的图 2a 蓝移一侧的能量分布。从图 2b 中可以看出, 能量分布上有两个明显的特征峰, 一个在 0.3eV 处, 另一个在 4.0eV 左右, 在 1.5eV 左右有一个被 0.3eV 峰所混迭的峰。在 6—12eV 之间  $f(E)$  值较高, 而且分布较平坦。

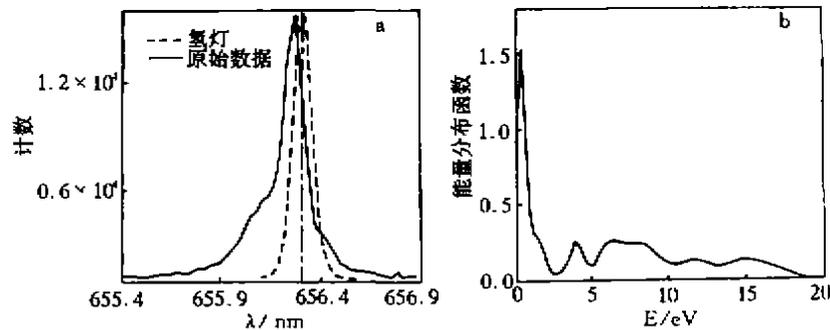
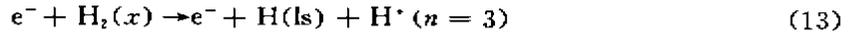
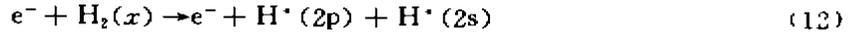
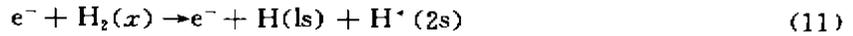
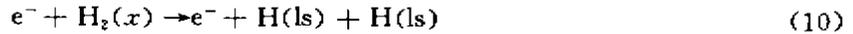


图 2 H<sub>α</sub> 谱线线型和中性氢的能量分布

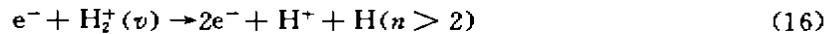
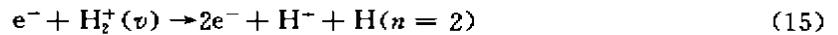
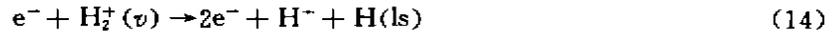
等离子体中的粒子最终会从芯部扩散到等离子体边界, 其中氢离子在经过鞘层时被加速, 获得的动能大约为  $3kT_s$ ,  $T_s$  是鞘层电子温度。当氢离子碰撞到孔栏时, 一部分中性化后变成氢原子, 反射回等离子体中, 在这个过程中粒子损失一定的能量。由于粒子损失的能量与入射角和入射能量大小有关, 因此反射回等离子体中的氢原子能量分布宽阔, 即形成图 2b 中 6—20eV 之间的分布。另一部分氢离子将被孔栏吸附, 在放电过程中再被解吸, 一般以分子形式进入等离子体。当氢分子进入等离子体时, 它的速度大约等于室温下的热运动速度(冷壁条件下), 即  $v_{H_2} = 1.5 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 氢分子的电子碰撞电离系数  $S_{H_2} = \langle \sigma_e v \rangle \approx 1 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 有效截面  $\sigma_{\text{eff}} = \frac{\langle \sigma_e v \rangle}{v_{H_2}} = 6.7 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ , 氢分子平均自由程  $\lambda_0 \leq \frac{1}{n(a)\sigma_{\text{eff}}} = 1.4 \text{ cm}$ , 式中  $n(a) = 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 。因此, 氢分子平均自由程仅稍大于 1cm, 在边界层内氢分子就会被电离或离解。Janev 等人列出了氢分子在等离子体边界与电子碰撞可能发生的十几种分子过程<sup>[4,5]</sup>, 并从理论上计算了在这些过程中电子的平均能量损失和产生的氢原子或离子所获得的平均动能。

氢分子与电子直接碰撞离解并能产生中性氢原子的过程有<sup>[4]</sup>:



在上面的分子过程中,电子损失动能分别为 10.5、15.3、34.6 和 21.5eV,中性氢原子获得的平均动能分别为 3.0、0.3、4.85 和 2.5eV。这些过程都是氢分子首先被激发到激发的分子态  $H_2(x)$ ,而后分子直接离解。式(11)的中性氢原子获得的动能在 0—1.4eV 之间,峰值在 0.3eV,与图 2b 上 0.3eV 的能量峰相符。这个过程形成所谓的慢原子,电子损失能量 15.3eV。

氢分子电离离解并能产生氢原子的过程有<sup>[4,5]</sup>:



三个过程中氢原子获得的平均动能分别为 4.3、1.5 和  $\frac{1}{2}(E_e - 13.6/n^2)$ eV。这些过程都是分子首先被电离,即  $e^- + H_2(x) \rightarrow 2e^- + H_2^+(v)$ ,电子损失能量在 18—38eV 之间,峰值在 25eV 左右。式(14)和式(15)的氢原子获得的动能与图 2b 中 4.0eV 和 1.5eV 两个能量峰基本相符。因此,HT-6M 托卡马克等离子体边界发生的分子过程有式(11)、(14)和(15)所示的氢分子的激发离解和电离离解。当然,也可能存在其它的过程,即发生反应后的原子或分子直接电离,而不产生氢原子,因此这样的过程就不能从氢原子的能量分布上反映出来。

事实上,上面列出的反应都可能发生,起决定作用的是边界电子温度,相反也能从发生的反应估计边界电子温度。比较上述分子过程中电子损失能量,估计 HT-6M 托卡马克在欧姆放电时的电子温度在 15—25eV 之间。

#### 4 再循环粒子的入射速度

假定在我们的观测方向,一定时间内反射回等离子体的中性粒子速度分布近似满足麦克斯韦分布:

$$n(v - v_0)dv = N\left(\frac{1}{\pi v_0^2}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{(v - v_0) \cdot (v - v_0)}{v_0^2}\right]dv \quad (17)$$

这部分中性氢原子辐射形成的线型满足高斯型分布:

$$f(\lambda - \lambda_c) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta\lambda_D} \exp\left\{-\frac{[\lambda - \lambda_c(1 - \frac{v_0}{c} \cos\theta)]^2}{\Delta\lambda_D^2}\right\} \quad (18)$$

由多普勒展宽  $\Delta\lambda_c$  可求得离子温度  $T$ ,由多普勒频移  $\lambda - \lambda_c$  可得到辐射粒子定向流速。

对于吸附的氢将以分子形式由热解吸进入等离子体。氢分子在刮削层(SOL)附近就会被离解,形成中性氢原子,可以近似认为这部分氢原子也是处于热平衡或至少在观测方向、一定时间间隔内处于局部热平衡,故这部分氢原子的  $H_\alpha$  谱线线型也是高斯型。

因此,OSMA系统探测的H<sub>α</sub>谱线线型是由上述两部分中性氢原子发射谱集体贡献的结果。第一部分反映的是粒子反射前的整体行为,由于包含一个未知的反射率,仅能由多普勒频移得出它们入射速度。第二部分反映的主要是边界行为,能从谱线的多普勒展宽和频移分别得出边界等离子体离子体温度和粒子入射速度。由于两个部分相互独立,不能用单高斯拟合。

图3是对图2a进行的双高斯拟合,拟合后的剩余量在正负2%范围内随机变化,吻合得很好。

第一个宽阔的高斯分布即是由反射回等离子体中的能量较高的氢原子发射形成的H<sub>α</sub>谱线线型,其面积占整个线型面积的60%,因此这部分粒子数占探测区域内的氢原子数的60%。统计不同的欧姆放电时的实验结果,这个值变化范围在57%—62%之间,比一些大装置测量结果的30%—50%左右要大些<sup>[6]</sup>。这是由于一方面HT-6M孔栏是不锈钢做的,它对粒子的反射率比低Z材料大;另一方面,HT-6M边界电子温度低,鞘层电位低,离子的定向入射速度较小,因而粒子的反射率高。用氢灯标定它的中心波长,得出多普勒频移 $\Delta\lambda \approx 0.07\text{nm}$ ,因此这部分中性氢原子大约以 $3.0 \times 10^4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $v = c\Delta\lambda/\lambda$ )的速度进入等离子体。

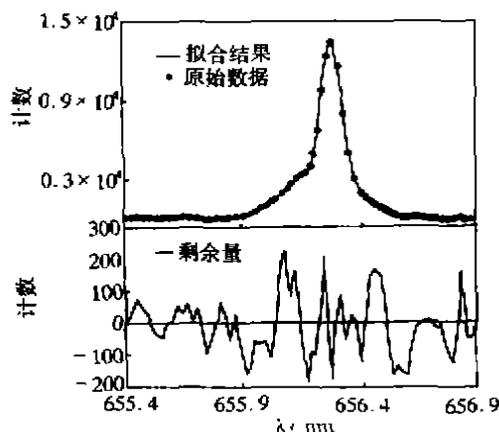


图3 双高斯拟合

第二个较窄的高斯分布是由氢分子离解产生的中性氢原子发射的H<sub>α</sub>谱线线型,其面积占整个线型面积的40%,因此,占探测区域内的氢原子数的40%。它的中心波长向短波方向偏移0.015nm,因此,这部分中性氢原子以将近 $1 \times 10^4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度进入等离子体,相当于0.3—0.4eV的动能。这不是来源于热运动,而是取决于式(11)的氢分子离解过程中的能量交换,即氢分子与电子碰撞离解成两个氢原子,氢原子获得的平均动能为0.3eV。

## 5 总结

根据上面的分析可知,HT-6M托卡马克边界循环粒子主要由两部分组成,一部分是离子中性化后的反射,占循环粒子数60%,入射速度为 $3.0 \times 10^4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;另一部分是氢分子解吸后在边界发生电离离解和离解激发所产生的氢原子,占循环粒子数的40%,入射速度约为 $1 \times 10^4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这些参数的获得为研究中性粒子输运提供了重要的实验数据。

感谢中国科学院等离子体物理研究所六室的方自深、毛剑珊、李建刚研究员在实验中给予的帮助。

## 参考文献

- 1 Equip TFR. Influence of Recycling on Plasma Behavior. Nucl. Fusion, 1978, 18(5), 647.
- 2 Johnson L C. Collisions Ionization Rate and Excitation Rate of Hydrogen Atoms with Electron. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 1973, 13, 333.
- 3 Ogawa T, Higo M. Collisions of Hydrogen Atoms and Ions with Atoms and Molecules. Chem. Phys. Lett., 1979, 65, 610.
- 4 Janev R K, Post D E, Langer W D, et al. Survey of Atomic Processes in Edge Plasma. J. Nucl. Mater., 1984, 121, 10.
- 5 Janev R K, Harrison M F A, Drwin H W, et al. Atomic and Molecular Database for Fusion Plasma Edges Studies. Nucl. Fusion, 1989, 29(1), 109.
- 6 Samm U, Bogen P, Hartwing H, et al. Plasma Edge Physics in the TEXTOR Tokamak with Poloidal and Toroidal Limiter. J. Nucl. Mater., 1989, 162—164, 24.

• (编辑部 1998 年 9 月 22 日收稿)  
1999 年 1 月 11 日收到修改稿)

## PARTICLE RECYCLING AT EDGE IN THE HT-6M TOKAMAK

XU Wei

(Department of physics, Guangzhou Normal University, Guangzhou 510400)

WAN Baonian

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

## ABSTRACT

High-resolution  $H_{\alpha}$  line contour has been measured with optical spectroscopy multichannel analyzer(OSMA). The energy distribution of neutral hydrogen atom has been derived from the  $H_{\alpha}$  line contour, which shows that the main process of the particles at the edge of plasma is the reflection of the ions neutralized at the surface of the limiter, the excited and ionized dissociation of the hydrogen molecule by electron impact. The incident velocity of recycling particle has been given with Gaussian fitting.

**Key words**  $H_{\alpha}$  line contour Energy distribution Molecular processes Gaussian fitting