

23

417-420

第10卷 第3期  
1998年8月强激光与粒子束  
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMSVol. 10, No. 3  
Aug., 1998

## HT-6M 杂质通量和杂质循环 TL631.24

徐伟

万宝年

TL612.2

(广州师范学院物理系, 广州 510400)

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥230031)

**摘要** 利用多道光学分析仪和可见多道光谱探测系统测量了 HT-6M 两种主要杂质的朝内的通量, 分析了它们产生的机制和循环途径。

**关键词** 杂质通量 杂质循环 循环途径

**中图分类号** TL612.2

等离子体 托卡马克

杂质对等离子体的影响主要有:(1)中、高  $Z$  杂质强烈的线辐射和韧致辐射降低了等离子体芯部的温度, 直接影响点火条件的实现<sup>[1]</sup>; (2)在等离子体边界区, 杂质尤其是低  $Z$  杂质(如碳和氧)强烈的电离和辐射, 影响了磁面的平衡<sup>[2]</sup>, 辐射功率随电子密度  $n_e$  和杂质密度  $n_z$  乘积的增大而增强, 引起与密度极限相关的“Marfes”、脱栏等离子体(DP)和破裂等不稳定性的产生, 从而限制实现聚变所需的高密度; (3)磁流体力学(MHD)不稳定性造成了压力极限, 等离子体芯部的杂质增加了等离子体的总压力, 因而减小了氘氚离子的密度  $n_{DT}$ , 通过对原料的“稀释”也减小了聚变功率和氘氚离子所需的加热功率。

## 1 实验仪器与各参数

所用测量仪器有:(1)光学多道分析仪<sup>[4]</sup>, 配备三块1200g/mm的全息光栅, 对应探头的谱分辨率为0.023nm/像素, 一次可以摄谱段约15nm。(2)多道可见光谱探测系统和多道  $H_\alpha$  测量系统都是具有较好时间响应的光电倍增管, 分别用来探测 C III、O I 和  $H_\alpha$  辐射信号随时间的变化, 多道可见光谱探测系统的空间分辨率1cm、时间响应500kHz、测量范围370~800nm。由于系统参数会因实验环境改变, 每天实验时三套系统都需重新标定。

HT-6M 托卡马克大、小半径分别为63cm、20cm, 纵场为0.8~1.2T, 中心和边界电子密度分别为  $1.0 \times 10^{13} \sim 1.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$  和  $1.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ , 中心电子和离子温度分别为600eV 和200eV。

## 2 杂质通量

从限制器和壁中释放的中性氢和杂质在等离子体狭窄的壳层内就会被剥离或电离, 并伴随着激发和辐射, 通过测量电离率和激发率的比值, 就能知道每辐射一个光子有多少个原子或离子被电离。实际操作相反, 常见的几种元素几个较为典型的电离态的电离率和激发率是已知的<sup>[5]</sup>, 因此只要测量出某一谱线的发射光子数, 就能得出被电离的原子或离子数量。朝内的通量可表示为<sup>[6]</sup>

$$\Gamma_0 = 4\pi sI/\chi B \quad (1)$$

式中,  $s$  为电离率,  $\chi$  为激发率,  $I$  为谱线的弦积分亮度,  $B$  为该谱线的分支比。

• 1998年4月29日收到原稿, 1998年5月5日收到修改稿。

徐伟, 1964年7月出生, 博士

## 2.1 碳朝内的通量

选用谱线 C I 657.8nm(基态)和 C II 514.5nm(亚稳态)。由(1)式求 C<sup>-</sup>朝内的通量。亚稳态 2s2p<sup>2</sup> 能级较低(5.3eV),因而离子数较多,其通量大约是基态通量的 15%, C<sup>-</sup>总通量为  $1.2 \times 10^{13}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在大多数托卡马克中 C II 464.7nm 谱线非常强,容易探测,但其跃迁组态是 2s3p-2s3s,只能从它的强度求得亚稳态通量。亚稳态 2s2p 能级较低(6.5eV),因而处于该亚稳态的离子数与基态为同一量级,约为总通量的 60%, C<sup>2+</sup>总通量为  $7.5 \times 10^{13}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  与 C<sup>-</sup>的通量为同一量级,一般条件下,利用 C I 657.8nm 或 C II 464.7nm 谱线求得的 C<sup>+</sup>和 C<sup>2+</sup>通量可近似地代表碳的中性通量,值得注意的是,使用的光谱仪必须能分辨 C II 464.7nm 谱线附近的两条强线,即 O II 464.9nm 和 C II 465.0nm,否则求得的碳的通量会偏大。

## 2.2 氧朝内的通量

大多数托卡马克中的氧通量都是由 O I 441.5nm 谱线的强度求得,其跃迁组态是 2p<sup>3</sup>3p-2p<sup>3</sup>3s,只能由谱线的强度来求出亚稳态的通量。但处于低能级亚稳态 2s<sup>2</sup>2p<sup>3</sup>(33eV)和 2s<sup>2</sup>2p<sup>4</sup>(5.0eV)的离子数与基态离子数相当,能较好地表示氧的通量。另一个亚稳态的通量可用谱线 O II 397.3nm 的强度求得,基态通量可由谱线 O II 374.9nm 的强度求得,总通量为  $1.1 \times 10^{14}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,其中基态通量约为 47%, O I 441.5nm 对应的亚稳态为 40%。一般情况下,直接由 O I 441.5nm 谱线的绝对强度求得氧的通量,不会造成量级上的误差。

## 3 杂质循环

等离子体中的杂质离子来源于等离子体和限制器与壁间的相互作用,它们最终会沉积于限制器和壁上(只有少量被永久地抽走),在放电过程中通过溅射、解吸和单极弧等方式再进入等离子体,一般来说,溅射<sup>[3]</sup>是杂质的主要来源。不同装置杂质的循环方式差异很大。

图 1 给出了在欧姆放电条件下碳、氧同氢的通量比, C II、O I 和 H<sub>0</sub> 的辐射信号以及电子密度  $n_e$  随时间的变化。由图可见  $\Gamma_{\text{O}}/\Gamma_{\text{H}}$  和  $\Gamma_{\text{C}}/\Gamma_{\text{H}}$  ( $\Gamma_{\text{C}}$ 、 $\Gamma_{\text{O}}$  和  $\Gamma_{\text{H}}$  分别表示 C<sup>2+</sup>、O<sup>+</sup> 和 H<sup>0</sup> 的通量)的行为极其相似,在放电初期逐渐增大,到平顶端基本维持不变。图 2 是  $\Gamma_{\text{O}}/\Gamma_{\text{H}}$  和  $\Gamma_{\text{C}}/\Gamma_{\text{H}}$  随  $n_e$  的变化。 $\Gamma_{\text{C}}/\Gamma_{\text{H}}$ 、 $\Gamma_{\text{O}}/\Gamma_{\text{H}}$  都随  $n_e$  增大而增大,当  $n_e$  达到  $1.3 \times 10^{19}/\text{m}^3$  时,  $\Gamma_{\text{C}}/\Gamma_{\text{H}}$  维持在 0.3~0.4,  $\Gamma_{\text{O}}/\Gamma_{\text{H}}$  维持在 0.5~0.6, 都不再增大。统计不同的放电结果,  $\Gamma_{\text{O}}/\Gamma_{\text{H}}$  和  $\Gamma_{\text{C}}/\Gamma_{\text{H}}$  的变化趋势和数值重复得非常好,因此上面的结果是可靠的。

假定等离子体在放电平顶端处于稳态,杂质朝内的通量等于朝外的通量,即:  $\Gamma_{\text{in}} = \Gamma_{\text{out}}$ , 对于碳有

$$\Gamma_{\text{in}}^{\text{C}} = \Gamma_{\text{out}}^{\text{H}} \alpha_{\text{H}}^{\text{C}} + \Gamma_{\text{out}}^{\text{C}} \alpha_{\text{C}}^{\text{C}} + \Gamma_{\text{out}}^{\text{O}} \alpha_{\text{O}}^{\text{C}} \quad (2)$$

式中,  $\alpha_{\text{H}}^{\text{C}}$  为氢对碳的溅射率,  $\alpha_{\text{C}}^{\text{C}}$  为碳的自溅射率,  $\alpha_{\text{O}}^{\text{C}}$  为氧对碳的溅射率。HT-6M 托卡马克中的离子经过壳层加速入射到限制器上,能量大约为 30~40eV,在该能量段,  $\alpha_{\text{H}}^{\text{C}}$ 、 $\alpha_{\text{C}}^{\text{C}}$  小于  $10^{-5}$ <sup>[7]</sup>。因此,前两项可忽略,易得在放电平顶端  $\alpha_{\text{O}}^{\text{C}}$  约为 0.6~0.7,这与氧对碳的化学溅射率相当<sup>[6]</sup>。

对于氧有

$$\Gamma_{\text{in}}^{\text{O}} = \Gamma_{\text{out}}^{\text{H}} \alpha_{\text{H}}^{\text{O}} + \Gamma_{\text{out}}^{\text{C}} \alpha_{\text{C}}^{\text{O}} + \Gamma_{\text{out}}^{\text{O}} \alpha_{\text{O}}^{\text{O}} \quad (3)$$

式中氧自溅射  $\alpha_{\text{O}}^{\text{O}}$  可忽略。在室温下,氢对氧的化学溅射率约为 0.2<sup>[7]</sup>,由此可得碳对氧的溅射率  $\alpha_{\text{C}}^{\text{O}}$  为 0.4~0.5。

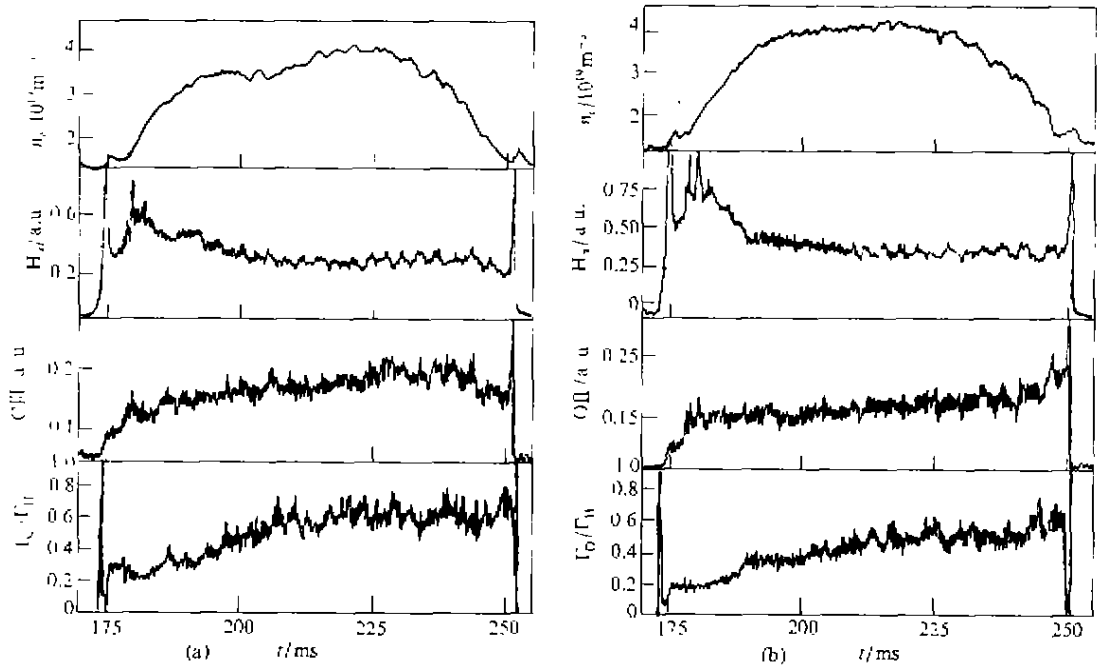
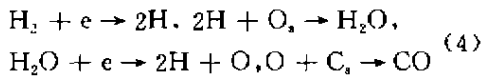


Fig. 1 Several spectral line selected

图 1 碳、氧的通量随时间变化

从上面的分析可以肯定再循环的碳氧杂质主要由化学溅射产生<sup>[7]</sup>:



式中,  $\text{C}_s$  和  $\text{O}_s$  表示表面的碳和氧。来源于分子离解的氢或反射氢原子首先与限制器表面的氧复合形成水蒸汽, 在电子碰撞下分解成氢和氧, 一部分氧进入等离子体, 一部分在刮削层内电离沉积到限制器或壁表面。还有一部分与限制器或壁表面的碳复合成一氧化碳进入刮削层, 碰撞电离后, 氧一部分进入等离子体, 另一部分沉积到限制器或壁表面, 继续参与循环。因此控制氧杂质十分重要, 不但能减少它自身的来源, 也能有效地减少氧对碳的溅射。

### 5 结 论

正常欧姆放电条件下, HT-6M 托卡马克碳氧杂质的人射通量分别在  $10^{13}$  和  $10^{14}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  左右, 它们在稳态时与氢的通量比分别为 0.4 和 0.6 左右; 杂质产生的主要机制是化学溅射;

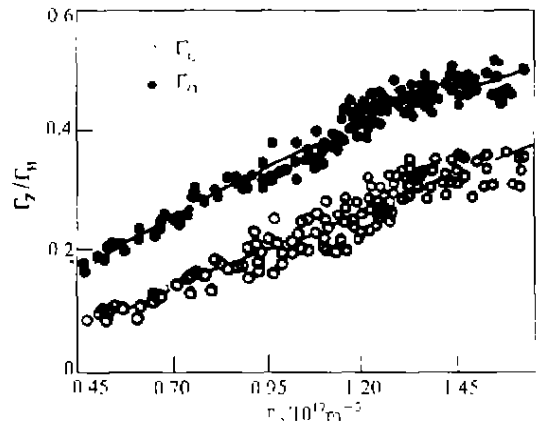


Fig. 2 The evolution of the ratio  $\Gamma_{\text{O}}/\Gamma_{\text{H}}$  and  $\Gamma_{\text{C}}/\Gamma_{\text{H}}$  with electron density

图 2  $\Gamma_{\text{C}}/\Gamma_{\text{H}}$  和  $\Gamma_{\text{O}}/\Gamma_{\text{H}}$  随电子密度的变化

在循环过程中氧杂质起着决定性的作用。

致 谢 中国科学院等离子体物理研究所六室光谱组的方自深、毛剑珊研究员，以及 HT-6M 运行组的李建刚研究员在实验中给予了帮助。

### 参考文献

- 1 Jensen R V, Post D E, et al. *Nucl Sci Eng.* 1978, **65**:282
- 2 Rebut P H, Brusati M. *Plasma Phys Control Fusion*, 1986, **28**:113
- 3 McCracken G M, Stott P E. *Nucl Fusion*, 1979, **19**:889
- 4 徐 伟等. H $\alpha$  谱线线形分析. *物理学报*, 1997, **46**(7):1360
- 5 Behringer K J. *J Nucl Mater.* 1987, **45**:145~147
- 6 Isler R C. *Nucl Fusion*, 1984, **24**:1599
- 7 Roth J. *J Nucl Mater.* 1987, **87**:145~147
- 8 Stott H F, et al. *Nucl Fusion*, 1975, **15**:431

## IMPURITY INFLUX AND RECYCLING IN HT-6M TOKAMAK

Xu Wei

*Department of Physics, Guang Zhou Normal University, Guang Zhou, 510400*

Wan Baonian

*Institute of Plasma Physics, Academical Sinca, Hefei, 230031*

**ABSTRACT** Two main impurity influx had been measured with Optical Spectroscope Multichannel Analysis in HT-6M Tokamak. The producing mechanism and recycling ways had been analyzed.

**KEY WORDS** impurity influx, impurity recycling, recycling ways