

由软 X 辐射强度确定 CT-6B 装置中 杂质氧的含量及有效电荷 Z_{eff}

万柏坤 戚震枝 郑少白

(中国科学院物理研究所)

1982 年 1 月 8 日收到

在研究热核聚变的实验装置内, 获得高温等离子体的主要困难之一是在纯氢等离子体中混进了各种杂质. 其存在, 增加了辐射能量损失, 降低了等离子体温度. 通常用有效电荷 Z_{eff} 来表示杂质对氢等离子体的污染程度. 它的定义如下:

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_k N_k Z_k^2}{\sum_k N_k Z_k} = 1 + \sum_{ij} C_i X_{ij} Z_{ij} (Z_{ij} - 1), \quad (1)$$

其中 N_k 为第 k 种离子的浓度, Z_k 为它的电荷. \sum_k 为对所有种类离子求和. C_i 为一种杂质的总密度与电子密度 N_e 之比. X_{ij} 为该种杂质中电荷为 Z_{ij} 离化态的相对丰度. 由电中性原理有

$$N_e = \sum_k N_k Z_k, \quad (2)$$

同时有

$$N_k = N_e C_k \sum_j X_{kj}. \quad (3)$$

从(1)式看出: 对于纯氢等离子体, $Z_{\text{eff}} = 1$. 随杂质含量的增加, Z_{eff} 变大.

有效电荷 Z_{eff} 的测量方法很多. 本文介绍一种在 CT-6B 装置上使用的简单方法, 即测定等离子体在软 X 射线区 (0.5—13 Å) 的辐射来确定有效电荷 Z_{eff} 及杂质氧含量.

CT-6B 是托卡马克型实验装置. 它由 CT-6 改装而成^[1,2]. 无铜壳, 有铁芯. 其主要运行参数大致如下:

大直径	$D = 91\text{cm}$
等离子体环小半径	$a_p = 8-10\text{cm}$
纵向磁场	$B_z = 10-15\text{kG}$
等离子体电流	$\sim 30\text{kA}$

基本原理

电子温度为百电子伏量级的高温等离子体, 在软 X 射线区的辐射主要由韧致辐射和复合辐射组成. 若电子速度按麦克斯韦分布, 温度为 T_e , 则单位体积、单位立体角中辐射功率谱分布如下^[3]:

$$P_\lambda = N_e^2 \frac{1}{\lambda^2 \sqrt{T_e}} \exp\left(-\frac{12398}{\lambda T_e}\right) \sum_{ij} C_i X_{ij} Z_{ij}^2 \times \left\{ 1.51 \times 10^{-23} g_{\text{ff}}(ij) + 4.12 \times 10^{-22} g_{\text{fb}}(ij) \frac{Z_{ij}^2 \exp\left(\frac{E_{ij-1}}{T_e}\right)}{n_{ij-1}^3 T_e} \right\}, \quad (4)$$

其中 Z_{ij} , n_{ij-1} , E_{ij-1} , 分别为第 i 种杂质中第 j 种离子态的电荷, 复合后基态的主量子数及电离电位. g_{ff} , g_{fb} 为高登因子, 在计算中近似为 1. (4) 式中单位如下: N_e 为 cm^{-3} , λ 为 Å, T_e 为 eV, E_{ij} 为 eV, P_λ 为 $\mu\text{Wcm}^{-3}\text{Å}^{-1}(\text{sr})^{-1}$.

不同离化态的丰度 X_{ij} 可由离化复合平衡方程得到. 考虑到在双电子复合过程的修正日冕模型下

$$\frac{X_{ij+1}}{X_{ij}} = \frac{S_{ij}}{\alpha_{ij+1}}, \quad (5)$$

其中 S_{ij} 为电离态 (ij) 进一步电离的电离系数, α_{ij+1} 为电离态 ($ij+1$) 的复合系数(包括双电

表1 氧杂质的电离、复合参数

j	Z_j	E_j	E'_j	ξ_j	ξ'_j	a_j	a'_j	b_j	b'_j	C_j	C'_j	μ_j	M_j	d_j	e_j	f_j
1	0	13.60	28.5	4	2	2.8	4.0	0.74	0.70	0.24	0.50	2	2	—	—	0
2	1	35.10	42.6	3	2	3.7	4.4	0.60	0.40	0.60	0.60	3	2	1	0.53	15
3	2	54.90	63.8	2	2	4.5	4.5	0.30	0.20	0.60	0.60	4	2	1.333	0.843	17
4	3	77.40	87.6	1	2	4.5	4.5	0	0	0	0	5	2	1.67	1.015	19
5	4	113.89	644	1	2	4.5	4.5	0	0	0	0	6	2	2	1.035	20
6	5	138.10	670	1	2	4.5	4.5	0	0	0	0	7	2	1	1.055	12
7	6	739.30	/	2	/	4.5	—	0	0	0	0	8	1	2	0.04	575
8	7	871.10	—	1	—	4.5	—	0	0	0	0	1	1	1	0.0605	652
9	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0

子复合)。它们的表达式分别如下¹⁾:

$$S_j = 6.7 \times 10^{-7} \frac{1}{T_e^{3/2}} \left\{ a_j \xi_j \left[\frac{F(E_j/T_e)}{E_j/T_e} - \frac{b_j e^{C_j} F(E_j/T_e + C_j)}{E_j/T_e + C_j} \right] + a'_j \xi'_j \left[\frac{F(E_j/T_e)}{E_j/T_e} - \frac{b'_j e^{C'_j} F(E'_j/T_e + C'_j)}{E'_j/T_e + C'_j} \right] \right\}; \quad (6)$$

$$\alpha_{j+1} = 2.6 \times 10^{-14} (\alpha_{j+1}^{(1)} + \alpha_{j+1}^{(2)}) + \alpha_{j+1}^{(d)}, \quad (7)$$

$$\alpha_{j+1}^{(1)} = (Z_j + 1)^2 \left(\frac{13.6}{T_e} \right)^{1/2} \frac{\mu_j E_j}{M_j T_e} \times \exp\left(\frac{E_j}{T_e}\right) F\left(\frac{E_j}{T_e}\right), \quad (8)$$

$$\alpha_{j+1}^{(2)} = \sum_{\nu=1}^{10} \frac{2(Z_j + 1)^4}{(M_j + \nu)^3} \left(\frac{13.6}{T_e} \right)^{3/2} \times \exp\left[\frac{13.6 \times (Z_j + 1)^2}{(M_j + \nu)^2 T_e} \right] \times F\left[\frac{13.6(Z_j + 1)^2}{(M_j + \nu)^2 T_e} \right], \quad (9)$$

$$\alpha_{j+1}^{(d)} = 1 \times 10^{-10} d_{j+1} \left(\frac{f_{j+1}}{T_e} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{f_{j+1}}{T_e}\right), \quad (10)$$

其中 S_j, α_{j+1} , 单位为 cm^3s^{-1} 。(6) 式中“ ν ”表示第一子壳层的数据, $F(x)$ 函数由下式给出:

$$F(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt, \quad (11)$$

其它常数随杂质种类变化而变化。表1给出杂质氧的数据。

另外由施必泽电阻公式, 我们可得托卡马克装置中环电阻 R_p 的表达式^[4]:

$$R_p = 3.05 \times 10^{-5} \frac{D \log \Lambda Z_{\text{eff}}}{a_p^2 T_e^{3/2} \gamma}, \quad (12)$$

式中 $\log \Lambda$ 为库仑对数, 计算中取值为 18. γ 为与 Z_{eff} 有关的修正系数。我们近似用下列级数表示:

$$\gamma = 1 - 1.41 \frac{1}{Z_{\text{eff}}} + 3.09 \frac{1}{Z_{\text{eff}}^2} - 4.06 \frac{1}{Z_{\text{eff}}^3} + 1.96 \frac{1}{Z_{\text{eff}}^4}. \quad (13)$$

从(1),(4),(5)及(12)式可知: 若等离子体中只有一种杂质起主要作用, 那末由 R_p, N_e 及 P_x 的测量值可计算出电子温度 T_e , 杂质含量 C 及有效电荷 Z_{eff} 。

在托卡马克装置中, 重杂质, 如铁、钨等含量较少, 当 $T_e < 300\text{eV}$ 时, 主要处于低电离态, 对辐射和电阻影响比较小。轻杂质主要是氧和碳, 前者最重要。当 $T_e > 100\text{eV}$ 时, 碳杂质基本上全部被剥离, 因此对辐射影响更小。故在通常 CT-6B 的工作范围之内 ($T_e = 100 - 300\text{eV}$), 只有杂质氧起主要作用。

测量方法

环电阻 R_p 由环电流 I_p 及环电压 V_p 计算得到, 电子密度 N_e 由 4mm 微波干涉法测量。

图1给出 CT-6B 上使用的软 X 射线测量设备的原理: 由等离子体辐射的软 X 射线经过吸收膜照射到接收器上, 再经放大器放大后输

1) 为了简化, 去掉 (6)-(10) 式中的全部角标 i 。

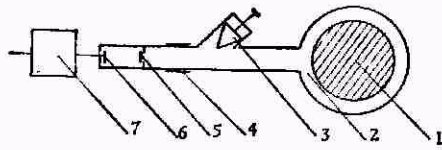


图1 软X射线测量设备原理图

1.等离子体; 2.主真空室; 3.直通超高阀; 4.陶瓷绝缘;
5.吸收膜; 6.接收器; 7.放大器

出,由示波器观察。

接收器为金-硅面垒探测器,吸收膜用以阻挡可见光及粒子对探测器的照射。它由 $4\mu\text{m}$ 的聚酯膜上喷 4000 \AA 铝组成。

设 I_s 为接收器的输出电流,

$$I_s = \frac{V_s}{R_s \beta} = K W_s, \quad (14)$$

其中 V_s , R_s , β 为放大器的输出电压,输入阻抗和放大倍数。 K 为接收器的能量转换灵敏度, W_s 为接收器的接收功率。它和 P_1 关系如下

$$W_s = S \int P_1 e^{-\sum_k \mu_k h_k} d\lambda, \quad (15)$$

其中 S 为接收器的接收立体角和等效接收体积的乘积。 μ_k , h_k 分别为吸收膜的吸收系数及厚度, \sum_k 为对各种吸收材料求和。

由上面讨论,我们可解得 R_p , I_s/N_e^2 , Z_{eff} , C 及 T_e 的关系,结果如图2所示。计算中取 $S = 1.37 \times 10^{-3} \text{cm}^3$, $a_p = 8.5 \text{cm}$, $K = A/3.6 \text{W}$ 。这样就可由 R_p , N_e , V_s 测量值,再从图2直接查得所需要的参数 Z_{eff} , 氧杂质含量 C 和电子温度 T_e 。

我们使用的放大器输入阻抗约 $50 \text{k}\Omega$, 放大倍数约 30db , 输出信号约 100mV 。

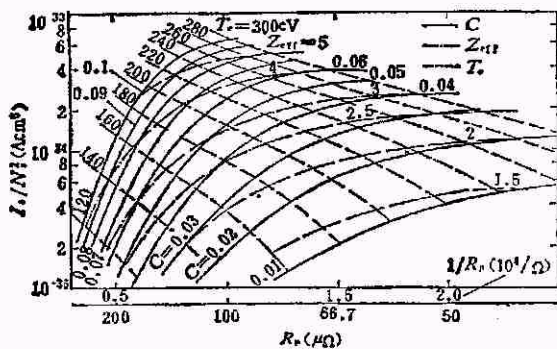


图2 C , Z_{eff} , T_e 和 R_p , I_s/N_e^2 关系曲线

测量结果及讨论

图3(a)给出一次典型放电时环电流 I_p , 环电压 V_p , 软X射线探测器输出电压及 4mm 微波干涉图。所用放大器输入阻抗 $R_s = 50 \text{k}\Omega$, 放大倍数为 40 。图3(b)给出放电中, N_e , R_p , T_e , Z_{eff} 及杂质氧含量 C 的计算值。放电 9ms 之前,由于电子温度比较低, I_p , V_p 变化比较剧烈,没有进行计算。

从图3看出在放电达到稳定之后,大部分时间内,有效电荷 $Z_{\text{eff}} \approx 3$, 杂质氧含量 $C \approx 6\%$, 此数值比较大,可能和真空室存在一个很小的微漏孔(漏气率为 $2 \times 10^{-5} \text{Torr/s}$)有关。在 20ms 之后出现破裂的前奏,看来此时存在某种不稳定性使等离子体 Z_{eff} 及 C 不断升高,最后出现破裂,放电中止。

稳定放电之后,电子密度不断提高。这显然是由于器壁返流造成。但在这过程中基本保持 Z_{eff} , C 不变,原因有待进一步弄清楚。

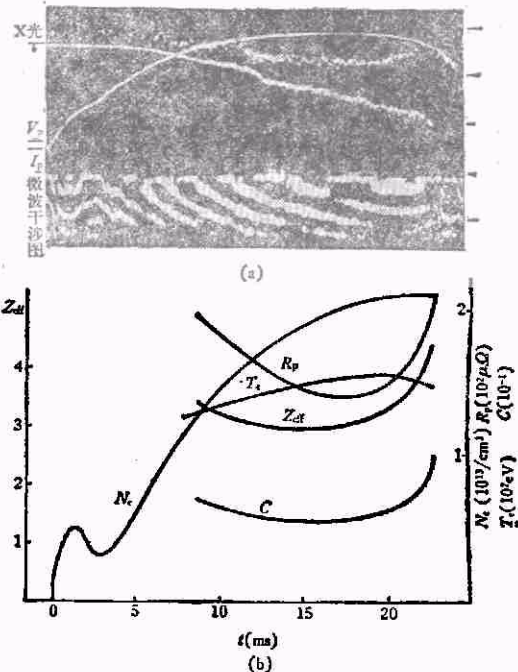


图3 CT-6B 参数变化图

(a) 中灵敏度为 X光 50mV/格 ; V_p 2V/格 ;
 I_p 10kA/格 ; 微波 69GHz

(下转 699 页)