

# EAST 托卡马克上截面效应对电荷交换复合光谱测量结果的影响

冯双园<sup>1,2</sup> 李颖颖<sup>2</sup> 余羿<sup>1</sup> 尹相辉<sup>1,2</sup> 符佳<sup>2</sup> 吕波<sup>2</sup>  
王华杰<sup>1,2</sup> 陈俊<sup>1,2</sup> 胡睿佶<sup>1,2</sup> 叶民友<sup>1,2</sup>

1 (中国科学技术大学 核科学技术学院 合肥 230026)

2 (中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘要** 离子温度和旋转速度是聚变等离子体中的重要物理参数,在先进实验超导托卡马克 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak)上电荷交换复合光谱(Charge eXchange Recombination Spectroscopy, CXRS)诊断是测量这些物理参数的标配诊断之一。由于截面效应的存在, CXRS 诊断测量的谱线线型会受到影响,导致得到的离子温度和旋转速度偏离实际值,为了得到真实值,需要对离子温度和旋转速度进行修正。在 EAST 上,分别采用常用的动力学理论和数值计算方法对测量到的实验数据进行修正,同时对比两种方法对截面效应的修正结果,可以看出两种方法得到的结果趋势基本一致。对 2015 年 EAST 上电荷交换复合光谱测量到的典型的实验数据进行修正,结果表明在目前的放电条件下截面效应对离子温度的影响比较小,而对旋转速度的影响低于 10%。

**关键词** 托卡马克, 电荷交换复合光谱诊断, 离子温度, 旋转速度, 截面效应

**中图分类号** TL65<sup>+</sup>1

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.040602

## Cross-section effect on charge exchange recombination spectroscopy measurement with the EAST tokamak

FENG Shuangyuan<sup>1,2</sup> LI Yingying<sup>2</sup> YU Yi<sup>1</sup> YIN Xianghui<sup>1,2</sup> FU Jia<sup>2</sup> LYU Bo<sup>2</sup>  
WANG Huajie<sup>1,2</sup> CHEN Jun<sup>1,2</sup> HU Ruijie<sup>1,2</sup> YE Minyou<sup>1,2</sup>

1 (School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

2 (Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract Background:** Charge-exchange spectroscopy is a powerful diagnostic tool for determining ion temperatures and rotational velocities in tokamak plasmas. This technique depends on detailed understanding of the atomic physics processes that affect the measured apparent velocities with respect to the true ion rotational velocities.

**Purpose:** The study aims to give correction to Charge eXchange Recombination Spectroscopy (CXRS) measurement with Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) because of energy dependence of the charge-exchange cross-sections. **Methods:** Kinetic theory and numerical approximation of cross-section effects are

国家自然科学基金(No.11405212、No.11175208)、国家磁约束核聚变发展研究专项(No. 2015GB103000、No.2012GB101001)、合肥物质科学技术中心方向项目培育基金(No.2014FXCX003)资助

第一作者: 冯双园, 女, 1990 年出生, 2013 年毕业于哈尔滨工程大学, 现为硕士研究生, 研究领域为等离子体物理

通信作者: 李颖颖, E-mail: liyy@ipp.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11405212, No.11175208), National Magnetic Confinement Fusion Science Program of China (No.2015GB103000, No.2012GB101001), Innovative Program of Development Foundation of Hefei Center for Physical Science and Technology (No.2014FXCX003)

First author: FENG Shuangyuan, female, born in 1990, graduated from Harbin Engineering University in 2013, master student, focusing on plasma physics

Corresponding author: LI Yingying, E-mail: liyy@ipp.ac.cn

收稿日期: 2015-11-27, 修回日期: 2015-12-22

usually used to evaluate the associated corrections. On EAST, kinetic theory and numerical approximation of cross-section effects will be applied to calculate the corrections. **Results:** A direct comparison between kinetic theory and numerical approximation of cross-section effects will be given. And kinetic theory is applied to give correction to the CXRS measure data in 2015. **Conclusion:** The correction results showed that two ways are feasible and charge-exchange cross-section effect has more influence on rotational velocity. It gives a possible way for the CXRS data correction because of charge-exchange cross-section effect.

**Key words** Tokamak, CXRS, Ion temperature, Rotation velocity, Cross-section effect

在磁约束等离子体装置中,中性束作为一种主要的加热方法得到了广泛的应用,因此基于中性束的主动诊断也逐渐发展起来。电荷交换复合光谱(Charge eXchange Recombination Spectroscopy, CXRS)诊断正是利用注入的高能中性束原子与杂质离子发生电荷交换反应从而获得杂质离子温度和旋转速度的主动光谱诊断,虽然先进实验超导托卡马克 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak)上二维弯晶谱仪同样测量等离子体温度和旋转速度,但由于其有诊断的空间局限性,同时 CXRS 还具有高精度和非接触式等优点<sup>[1]</sup>,因此电荷交换复合光谱诊断在 EAST 上也得到了重视及应用。电荷交换复合光谱诊断测量到的高斯型分布辐射谱线的半高全宽与离子温度直接相关,其多普勒频移量也与离子的定向运动速度  $v$  成正比,因此通过测量电荷交换后杂质离子激发态辐射跃迁后发出的辐射谱线的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)  $\Delta\lambda_{FWHM}$  及多普勒频移量  $\Delta\lambda_D$  就可得到杂质离子的离子温度和旋转速度剖面信息。

当观测视线垂直于离子回旋运动平面及中性束注入方向,测量到的谱线的多普勒展宽和频移可以准确地反映杂质离子的离子温度和旋转速度。然而在大部分情况下,观测视线并不能保证与中性束注入方向垂直,导致杂质离子与束粒子的相对运动速度增大(或减小),电荷交换复合反应的截面增大(或减小),使得从测量到的谱线中得出的离子温度或者旋转速度偏离实际值,而且温度越高,这种截面效应带来的影响也就越大。动力学理论<sup>[2]</sup>以及数值计算方法<sup>[3]</sup>现今多被用于对截面效应的修正。动力学理论截面效应修正是运用动力学方程来解释磁场和电场对电荷交换后速度的影响,其不仅考虑了抗磁性的影响而且还考虑了对激发态离子的影响,因而得到广泛应用;数值计算方法是利用拟合公式来进行截面效应修正,因其简单实用并且与在一定条件下与分析模型相差不大而得到广泛运用。EAST 上 CXRS 实验测量到的离子温度和旋转速度受到截面效应的影响,除了因中性束能量不同而引起的电荷交换截面不同外,还有就是由于观测视线与束线的

夹角而引起的电荷交换截面的不同,而实验中束能量已知,因此对 EAST 上 CXRS 数据进行截面效应修正需要空间标定来确定观测视线与束线夹角。

本文首先介绍了环向 CXRS 诊断的空间标定,然后再通过动力学理论以及数值计算这两种方法得到对截面效应修正结果并比较,获得适合 EAST 上环向 CXRS 诊断的方案,最后对 2015 年 EAST 上环向 CXRS 得到的实验数据进行电荷交换截面效应修正。

## 1 环向 CXRS 空间位置标定

在 EAST 上同向中性束沿 A 窗口切向注入, A 窗口轴线与 NBI (Neutral Beam Injection)中心线最大可成  $19.5^\circ$ ,中性粒子束注入的主要目的在于等离子体加热、电流以及旋转驱动三个主要方面,同时还为等离子体参数诊断提供束靶。EAST 上 D 窗口的环向 CXRS 诊断系统的观测区域沿着切向束有 30 道观测道,覆盖范围为  $1\ 500\text{--}2\ 370\text{ mm}$ <sup>[4-5]</sup>。EAST 装置上面中性束和环向电荷交换复合光谱诊断系统的俯视图如图 1。

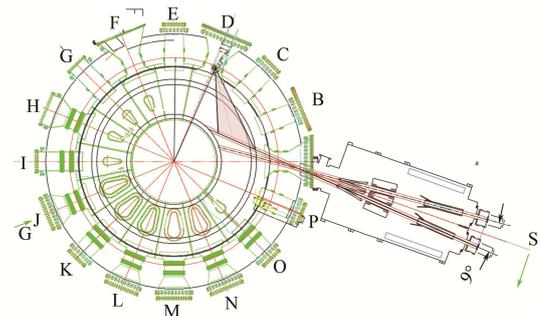


图 1 EAST-NBI 与环向 CXRS 诊断系统空间布局  
Fig.1 Spatial distributions of EAST-NBI and the toroidal CXRS diagnostic system.

截面效应是由于观测视线与切向 NBI 注入方向不垂直而产生的,因此在进行截面效应修正之前,需要得到观测视线和切向 NBI 的注入方向之间的夹角。而切向 NBI 注入方向是确定的,因此只要测量出观测视线就能够得到该夹角。而对观测视线的确定就需要对环向 CXRS 诊断系统进行空间标定。

故而在 CXRS 诊断系统的空间标定中, 重要的任务就是对观测视线的标定。空间标定通常采用光路可逆原理进行反向调节光路, 即对收光系统像平面的光纤束打激光, 通过收光镜头组成像于物平面上。同时利用组合测量系统中的机械臂确定三维坐标, 进而确定观测道的光路。

### 1.1 组合测量系统测量原理介绍

将激光跟踪仪及机械臂(柔性关节坐标测量臂)结合组成组合式大尺寸测量系统, 原理图如图 2 所示。主要就是利用坐标转换得到激光跟踪仪和机械臂之间的相对位置关系, 即转换机械臂的测量坐标系的原点  $O'$  到激光跟踪仪的测量坐标系中, 得到机械臂测量坐标系中的虚拟矢量  $OO'$  进行转换。

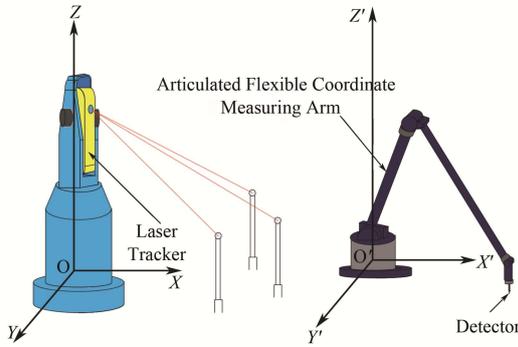


图 2 测量原理示意图  
Fig.2 Measurement principle diagram.

图 2 为其转换方法, 即首先建立  $j$  ( $j \geq 3$ ) 个临时的测量基准点, 而这些临时测量基准点必须在机械臂和激光跟踪仪都能测量到的地方处建立。然后在激光跟踪仪的测量坐标系  $O-XYZ$  下对这些基准点依次测量, 得到它们的坐标值并写成矩阵  $M$ 。其后同理使用机械臂进行测量, 把在机械臂测量坐标系  $O'-X'Y'Z'$  下得到的坐标值也同理写成矩阵  $N$ 。最后利用含有虚拟矢量  $OO'$  相关参数的  $4 \times 4$  矩阵  $X$  来表达两个测量坐标系之间的关系, 即有:

$$M = NX \quad (1)$$

其中:

$$M = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_i & y'_i & z'_i & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

转换矩阵  $X$  通过式(1)求出后, 通过机械臂实际测量到的坐标值转换成激光跟踪仪测量系下的坐标值就可以将机械臂和激光跟踪仪联系起来。在 EAST 装置允许打开的窗口架设激光跟踪仪, 然后测量 EAST 大厅四周墙面上测量基准网上的数个基准点实现其在 EAST 装置实验大厅柱坐标下的定位。之后在真空室内窗口附近建立内部基准点, 利用定位后的激光跟踪仪测量这些基准点, 就可以得到基准点在大厅柱坐标下的坐标值, 如图 3 所示。最后利用真空室内固定的机械臂和内部基准点即可得到机械臂在实验大厅柱坐标下的定位。然而 EAST 装置中不是所有的窗口都可以打开, 可以利用定位后的机械臂测量封闭窗口内的隐藏基准点, 得到隐藏基准点在在大厅柱坐标下的定位<sup>[6]</sup>。

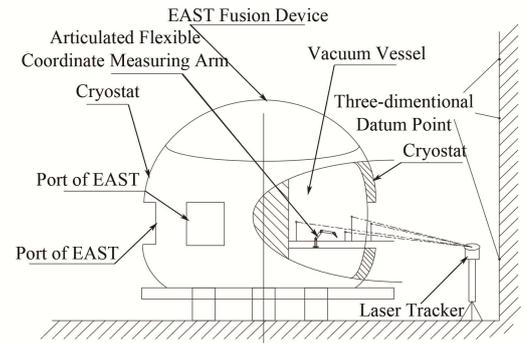


图 3 测量方法示意图  
Fig.3 Measuring method diagram.

### 1.2 观测视线光路确定

空间标定主要利用组合测量系统的柔性关节坐标测量臂在观测道光路上选取三个不同点进行三维空间坐标测量, 而机械臂的空间测量精度可达  $0.1 \text{ mm}$  以上, 远高于诊断系统想要达到的  $1 \text{ mm}$  的空间标定精度。在空间标定过程中, 由于人为误差等原因得到的每一条光路上的三个点不一定在一条直线上。为提高测量精度, 得到较准确的观测道光路, 采用拟合方法即先对每一条光路上测量到的三个点进行直线拟合, 而由于  $Z$  值变化较小且每条光路在  $X-Y$  平面上投影是一条直线, 所以在  $X-Y$  平面上对投影的三个点进行直线拟合(图 4), 在得到拟合直线后, 再将每一条光路画在 CAD (Computer Aided Design) 图中。得到的每一条光路都与 NBI 切向束相

交, 利用角度测量即可得到每一道光路与 NBI 切向束相交的夹角。

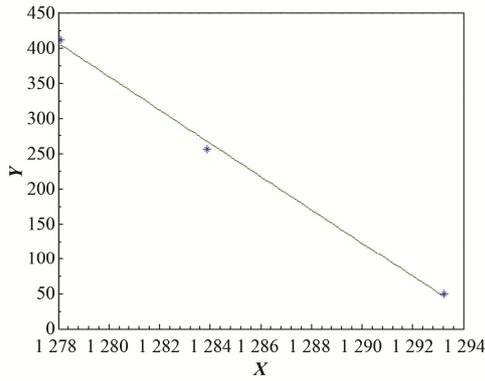


图4 D窗口1道拟合示意图  
Fig.4 1 fitting diagram of D port.

对环向 CXRS 上 30 道观测视线光路进行空间标定, 对应的大半径  $R$  为 1.5–2.3 m。30 道观测道与中性束之间的夹角如图 5 所示, 可以看出较外侧的观测道与中性束的夹角越小。

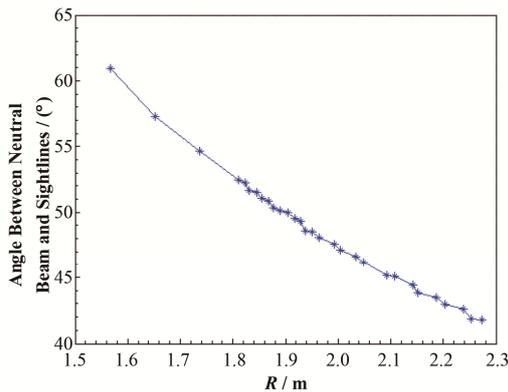


图5 30道视线与中性束之间的夹角  
Fig.5 Angle between neutral beam and thirty sightlines.

## 2 截面效应修正方法

在多数情况下因截面效应的影响由多普勒展宽和频移得到的温度和旋转速度并不准确, 截面效应的影响如图 6 所示。其中实线为原始速度分布图, 而虚线和点线分别表示蓝移和红移。当观测视线不与中性束注入方向垂直时, 如果是靠近观测视线的离子与中性束注入原子的相对速度更大一些, 电荷交换系数也就越大。因 EAST 上中性束能量一般小于 80 keV, 故电荷交换系数一般在图 7 中虚线的左侧, 而图 7 中  $D$  表示全能量,  $D/2$  表示半能量,  $D/3$  表示三分之一能量。所以在光谱中蓝移一侧 (波长

较小的一侧) 的谱线加强, 红移一侧 (波长较大的一侧) 的谱线减弱; 如果是远离视线的离子与中性束注入原子的相对速度更大一些, 那么情况则完全相反<sup>[7]</sup>, 本文将运用动力学理论和数值计算分别对电荷交换截面效应修正并进行比较。

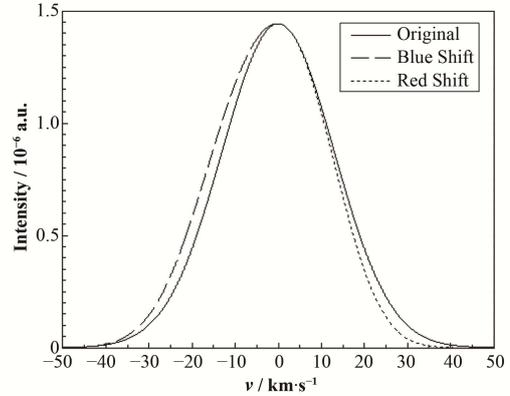


图6 观测视线与束线方向不垂直时截面效应的存在导致测量谱线形变示意图

Fig.6 Spectrum distortion because of charge exchange cross-section effect when the direction of the sightline isn't perpendicular to the direction of the neutral beam.

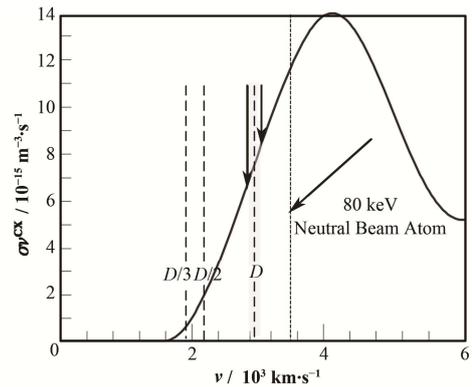


图7 有效发射率与速度的关系  
Fig.7 Charge exchange cross-sectional area as a function of velocity.

## 3 结果及分析

### 3.1 数值计算简介

在电荷交换反应中的发射系数  $Q = \sigma v$  能用一阶和二阶指数形式表达<sup>[3]</sup>:

$$Q = Q_0 \exp\left(\alpha(v_{\text{col}} - v_b) + \beta(v_{\text{col}} - v_b)^2\right) \quad (3)$$

对  $Q$  进行泰勒展开, 得到:

$$Q = Q_0 \left[ 1 + \frac{1}{Q_0} \frac{\partial Q}{\partial v} \Big|_{v=v_b} (v_{\text{col}} - v_b) + \frac{1}{2Q_0} \frac{\partial^2 Q}{\partial v^2} \Big|_{v=v_b} (v_{\text{col}} - v_b)^2 \right] \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{Q_0} \left. \frac{dQ}{dv} \right|_{v=v_b}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \left. \frac{1}{Q_0} \frac{d^2 Q}{dv^2} \right|_{v=v_b} - \alpha^2 \right) \quad (5)$$

在笛卡尔坐标系下, 令观察方向为  $Z$  轴, 中性束速度矢量  $v_b$  在  $Y$ - $Z$  平面上,  $\delta$  是  $Y$  轴与中性束注入方向的夹角。观察到谱线的多普勒宽度或离子温度:

$$T_{\text{obs}} = T_{\text{true}} \frac{1 - KT_{\text{true}} D}{G} \quad (6)$$

其中:

$$D = (\varepsilon \sin^2 \delta + \beta \cos^2 \delta) \\ G = 1 - KT_{\text{true}} (\varepsilon + \beta) + K^2 T_{\text{true}} \varepsilon \beta \quad (7)$$

式中: 常数  $K = 2e/m_z$ ,  $e$  是元电荷,  $m_z$  是杂质质量, 因为温度测量以  $\text{eV}$  表示, 所以常数  $K$  的量纲是  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。同时  $\varepsilon = \alpha/2v_b$  和  $\beta$  都是速度的量纲, 而观察到的多普勒频移或观察到的速度:

$$v_{\text{obs}} = -\frac{\alpha \sin \delta B K T_{\text{true}}}{2G} - \frac{C r_y - A r_z}{G} \quad (8)$$

其中:

$$A = 1 - K T_{\text{true}} (\varepsilon \sin^2 \delta + \beta \cos^2 \delta) \\ B = (1 - K T_{\text{true}} \varepsilon) \\ C = \sin^2 \delta \cos^2 \delta K T_{\text{true}} (\varepsilon - \beta) \quad (9)$$

$$v^{\text{CX}} = \frac{\Gamma^{\text{CX}}}{n_n^{(0)}} = v_{\text{rot}} + \frac{(v_b - v_{\text{rot}})}{|v_b - v_{\text{rot}}|} \times \frac{\int_{-\infty}^{\infty} dv Q(|v v_{\text{th}} + |v_b - v_{\text{rot}}||) \left[ 1 + \frac{v v_{\text{th}}}{|v_b - v_{\text{rot}}|} \right] \left[ \frac{v_{\text{th}}}{2|v_b - v_{\text{rot}}|} - v \right] e^{-v^2} n_b \frac{n_1}{\pi^{1/2}} v_{\text{th}}}{\int_{-\infty}^{\infty} dv Q(|v v_{\text{th}} + |v_b - v_{\text{rot}}||) \left( 1 + \frac{v v_{\text{th}}}{|v_b - v_{\text{rot}}|} \right) e^{-v^2} n_b \frac{n_1}{\pi^{1/2}}} = v_{\text{rot}} + \alpha \frac{(v_b - v_{\text{rot}})}{|v_b - v_{\text{rot}}|} \quad (12)$$

压力张量  $P_n \equiv m \int d^3 v v v f_n(v)$ , 进行变量变换  $u = v - v_b$ , 经过化简,  $P_n$  能被表示成标量压力与张量压力的形式, 即  $P_n^{(0)} = p_n^{(0)} I + \Pi_n^{(0)}$ , 这里  $I$  是单位张量, 压力张量  $\Pi_n^{(0)}$  由三部分组成,

$$\Pi_n^{(0)} = \Pi_1 + m (\Gamma^{\text{CX}} v_{\text{rot}} + v_{\text{rot}} \Gamma^{\text{CX}}) - m n_n^{(0)} v_{\text{rot}} v_{\text{rot}} \circ$$

如果视线的单位矢量为  $\hat{s}$ , 那么温度的最低阶形式将由式(13)表示:

$$n_n^{(0)} T_n^{(0)} = m \int d^3 v \left[ (v - v^{\text{CX}}) \cdot \hat{s} \right]^2 f_n^{(0)}(v) \quad (13)$$

式中:  $r_y = t_y v_{\text{toroidal}}$ ,  $r_z = t_z v_{\text{toroidal}}$  分别是环向速度在  $Y$ 、 $Z$  方向上的分量。

### 3.2 动力学理论简介

$n$  壳层激发态离子分布函数  $f_n(x, v)$  满足稳态的动力学方程<sup>[8-9]</sup>:

$$v \cdot \nabla f_n + \frac{Z_n e}{m} (E + v \times B) \cdot \nabla_v f_n = n_b |v - v_b| \sigma^{\text{CX}} (|v - v_b| f_1(v) - \frac{f_n}{\tau_n}) \quad (10)$$

当式(10)乘以  $v$ , 然后对速度积分, 就能得到电荷交换速度的精确方程:

$$\frac{1}{m} \nabla \cdot P_n - \frac{Z_n e}{m} (n_n E + \Gamma_n \times B) = \frac{\Gamma_n^{\text{CX}}}{\tau_n} - \frac{\Gamma_n}{\tau_n} \quad (11)$$

在式(11)中电荷交换后离子的密度是

$$n_n \equiv \int d^3 v f_n(v); \quad \text{速度 } v_n \text{ 来源于}$$

$$n_n v_n = \Gamma_n \equiv \int d^3 v v f_n(v); \quad \text{压力张量}$$

$$P_n \equiv m \int d^3 v v v f_n(v); \quad \text{电荷交换对速度的影响是}$$

$$\Gamma_n^{\text{CX}} = \tau_n n_b \int d^3 v |v - v_b| \sigma_n^{\text{CX}} (|v - v_b|) v f_1(v) \circ$$

简化后得到电荷交换后的速度:

如果重写  $[(v - v^{\text{CX}}) \cdot \hat{s}]^2$  写成并矢的形式即  $\hat{s} \cdot (v - v^{\text{CX}}) (v - v^{\text{CX}}) \cdot \hat{s}$ , 因此将其联系到  $P_n^{(0)}$ , 得到:

$$n_n^{(0)} T_n^{(0)} = p_n^{(0)} + \hat{s} \cdot \Pi_1 \cdot \hat{s} - m n_n^{(0)} \left[ \hat{s} \cdot (v_{\text{rot}} - v^{\text{CX}}) \right]^2 \quad (14)$$

### 3.3 比较及分析

分别使用动力学理论和数值计算两种方法, 对三个空间位置下碳 VI (C VI) 杂质谱线进行电荷交换截面效应修正, 两种方法比较得出的修正结果如图 8 所示。

从图 8(a)中可以看出, 两种方法的整体趋势一致, 而且离子温度在 0–5 keV 之间两种方法基本吻合, 在 5–20 keV 两种方法的差别低于 10%, 而在  $\delta=10^\circ$  的情况下差别更小; 在图 8(b)中看出, 两种方法的整体趋势也一致, 但用动力学理论方法算出来的速度差较数值方法大一些。EAST 上的 CXRS 由于电荷交换截面效应会给测量带来误差, 而动力学

理论方法较数值方法修正值普遍大一些。

同时对中性束全能量、半能量和三分之一能量下使用动力学理论和数值计算这两种方法进行修正, 如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 在全能量下相差非常小, 尤其在温度修正图中几乎重合, 而在半能量和三分之一能量情况下差别随着离子温度而变大。

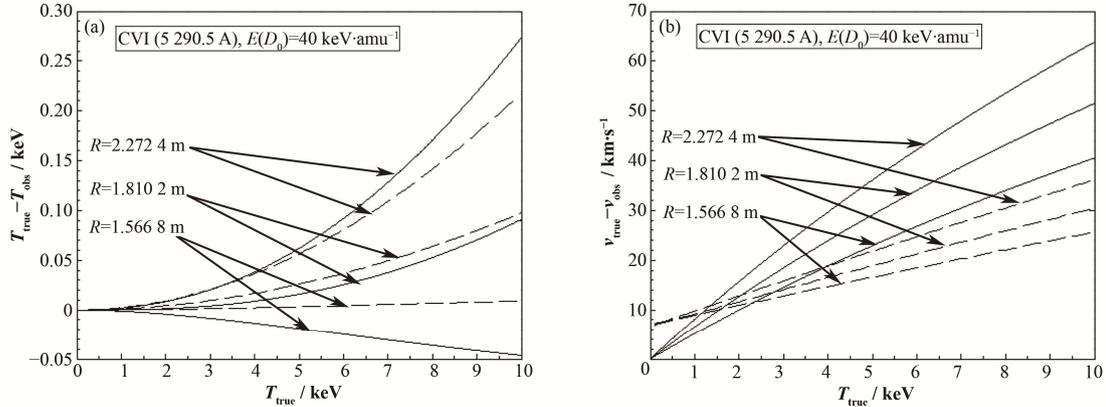


图 8 两种方法对温度(a)和速度(b)的修正比较

实线为动力学理论方法, 虚线为数值方法,  $E(D_0)=40 \text{ keV}\cdot\text{amu}^{-1}$ , CVI ( $n=8\rightarrow7$ ) CX 光谱

Fig.8 Comparison for ion temperature (a) and rotation velocity (b) correction of two methods.

Solid line is kinetic theory, dashed line is numerical approximation,  $E(D_0)=40 \text{ keV}\cdot\text{amu}^{-1}$ , CVI ( $n=8\rightarrow7$ ) CX spectrum

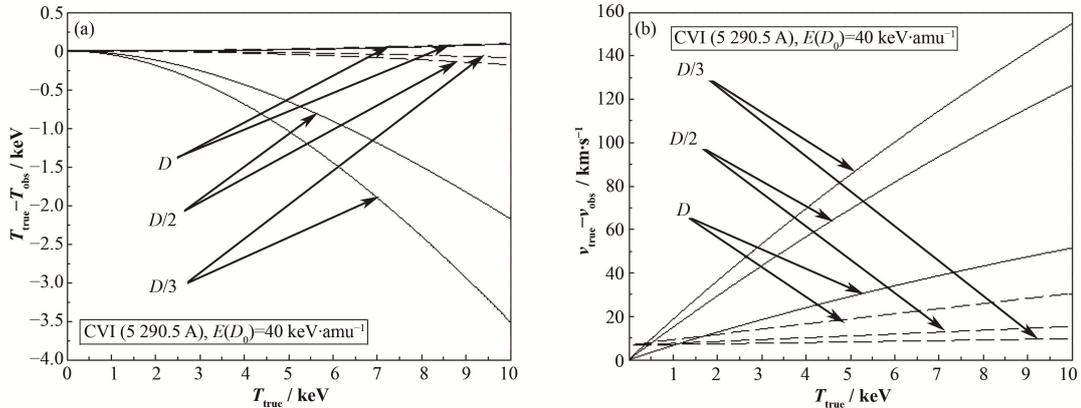


图 9 不同能量下的两种方法对温度(a)和速度(b)的修正比较

实线为动力学方法, 虚线为数值模拟方法,  $E(D_0)=40 \text{ keV}\cdot\text{amu}^{-1}$ , CVI ( $n=8\rightarrow7$ ) CX 光谱

Fig.9 Comparison for ion temperature (a) and rotation velocity (b) correction of two methods in different energies.

Solid line is kinetic theory, dashed line is numerical approximation,  $E(D_0)=40 \text{ keV}\cdot\text{amu}^{-1}$ , CVI ( $n=8\rightarrow7$ ) CX spectrum

#### 4 EAST 实验数据截面效应修正结果

电荷交换复合光谱诊断主要是测量低  $Z$  杂质 (如 CVI) 和氦中性束发生电荷交换反应产生的谱线, EAST 上 CXRS 诊断主要采用 CVI ( $n=8\rightarrow7$ ) 跃迁 ( $\lambda=529.059 \text{ nm}$ )。

本文采用动力学理论和数值计算两种方法对 EAST 上炮号为 54503 的 CXRS 诊断数据进行截面

效应的修正, 该炮的 NBI 束流分别为 25/30 A, 总功率为 1.5 MW, 在 1.7 s 注入等离子体, 截面效应修正前后的中心道离子温度和旋转速度随时间的演化如图 10 所示, 同时图 11 给出了  $t=4.0045 \text{ s}$  时, 修正前后的离子温度和旋转速度分布剖面。从图 11 中可以看出, 在目前的放电参数下, 电荷交换截面效应对旋转速度的影响较大, 对离子温度影响较小, 基本可以忽略。

从这两种方法比较可以看出,动力学理论方法对旋转速度的电荷交换截面效应修正结果明显大于数值计算对其的修正,因此在未来 EAST 数据修正

中采用动力学理论方法进行截面效应修正时可以认为是最大修正量。

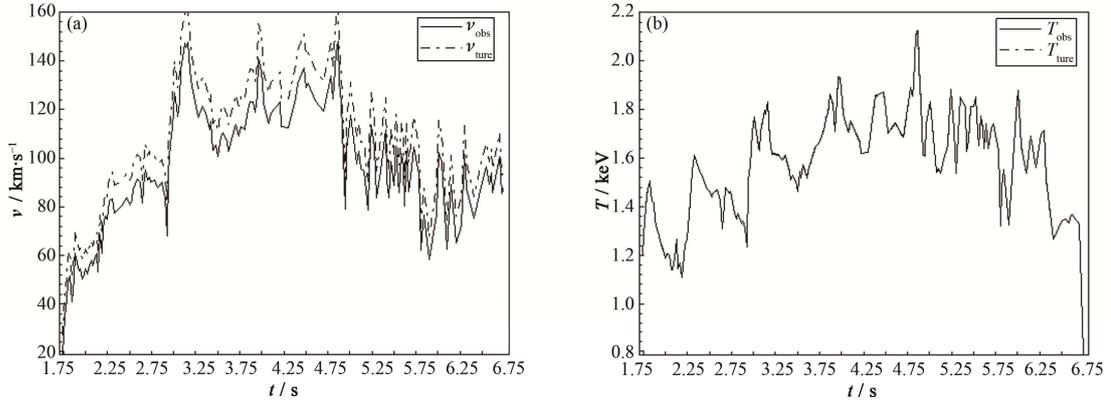


图 10 中心道随时间的截面效应速度(a)和离子温度(b)修正图  
Fig.10 Rotation velocity (a) and ion temperature (b) correction of the central channel for charge exchange cross-section effect over time.

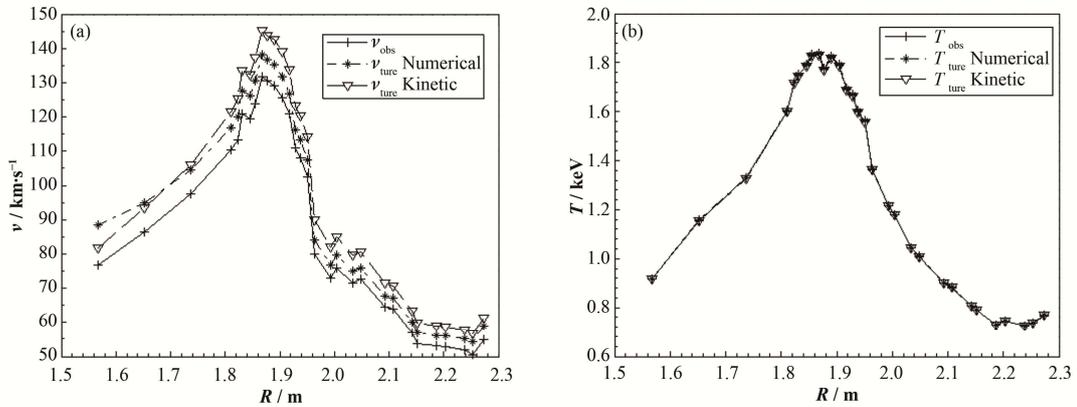


图 11 EAST 数值计算方法和动力学理论对截面效应速度(a)和离子温度(b)修正  
Fig.11 Rotation velocity (a) and ion temperature (b) correction for charge exchange cross-section effect using numerical approximation calculation and kinetic theory on EAST.

## 5 结语

对 CXRS 诊断系统而言,通常观测视线与中性束注入方向并不垂直,这会导致杂质离子与束粒子电荷交换复合反应的截面增大(或减小)。既然电荷交换截面效应不能避免,电荷交换截面效应修正就是非常重要的一步。而电荷交换截面效应修正更需要的是空间标定中对视线的确定,通过用机械臂使得空间标定更加精确,给后续修正带来误差也就越小。而动力学理论和数值计算是目前最常用的两种方法。两种方法虽存在一定的偏差,但变化趋势基本一致,对比结果为实际测量结果的修正提供了理论依据。

从 EAST 实验数据修正结果可以看出由于受电荷交换截面效应影响,速度测量值低于真实值,但是对离子温度影响较小。在本文的处理过程中,仅考虑全能量成分,下一步将在计算中并入 1/2 能量

和 1/3 能量成分以及激发态的影响。同时在锁模这种特殊放电模式下,旋转速度通常降至为零,在理论计算的同时将利用锁模放电来验证截面效应修正的准确性。

**致谢** 感谢 NBI 课题组,为 CXRS 的运行提供了基础,同时感谢测量组在空间标定中提供测量数据,为后面修正提供了帮助。

## 参考文献

- 1 王克依. 托卡马克电荷交换光谱数据分析方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013  
WANG Keyi. Charge exchange spectral data analysis method research on tokamak[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013
- 2 Burrell K H, Munoz B J M. Kinetic theory for charge-exchange spectroscopy: effects of magnetic and

- electric fields on the distribution function after charge-exchange[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, **19**(7): 072507. DOI: 10.1063/1.4736732
- 3 von Hellerman M, Breger P, Frieling J, *et al.* Analytical approximation of cross-section effects on charge exchange spectra observed in hot fusion plasmas[J]. *Plasma Physics & Controlled Fusion*, 1995, **37**(2): 71–94. DOI: 10.1088/0741-3335/37/2/002
- 4 张懿. EAST 托卡马克上环向 CXRS 诊断系统的标定[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015  
ZHANG Yi. The calibration of the toroidal CXRS diagnostic in EAST[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015
- 5 张懿. EAST 托卡马克电荷交换复合光谱诊断的绝对强度标定[J]. *核技术*, 2015, **38**(7): 070603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.070603  
ZHANG Yi. Absolute intensity calibration of the charge exchange recombination spectroscopy system on EAST[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, **38**(7): 070603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.070603
- 6 顾永奇, 于连栋. 组合式超大尺寸测量技术在 EAST 装置中的应用[J]. *工具技术*, 2012, **46**(3): 63–66  
GU Yongqi, YU Liandong. Combined large-scale measuring techniques in application of EAST device[J]. *Tool Engineering*, 2012, **46**(3): 63–66
- 7 李颖颖. EAST 边界被动光谱诊断系统与电荷复合交换光谱诊断系统研制及初步实验研究[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2013  
LI Yingying. Development of the edge rotation diagnostic and the charge exchange recombination spectroscopy and preliminary experiment studies on the EAST tokamak[D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2013
- 8 Bell R E, Synakowski E J. New understanding of poloidal rotation measurements in tokamak plasma[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2000, **547**(39): 39–52. DOI: 10.1063/1.1361778
- 9 Solomon W M, Burrell K, Feder R, *et al.* Characterization of cross-section correction to charge exchange recombination spectroscopy rotation measurements using co- and counter- neutral-beam views[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**(10): 10F531. DOI: 10.1063/1.2957841