

EAST 边界和芯部杂质谱线的时间延迟研究

叶大为^{1,2}, 丁芳^{1*}, 李克栋^{1,2}, 陈夏华^{1,2}, 罗宇^{1,2}, 张青^{1,2}, 孟令义^{1,2}, 罗广南^{1,2}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026

摘要 边界杂质注入是未来聚变装置 ITER 用于增强边界辐射, 减少第一壁热负荷的一种重要方法。但部分注入的杂质会被输运到芯部, 造成主等离子体辐射损失以及约束下降。光谱观测可以获取杂质种类、含量和分布等信息, 在理解等离子体中杂质输运方面起着重要作用。在 EAST(experimental advanced superconducting tokamak)偏滤器氩气(Ar)注入实验中, 利用偏滤器可见光谱和芯部极紫外光谱监测边界的 Ar¹⁺ 离子谱线 Ar II (401.36 nm)和芯部的 Ar¹⁵⁺ 离子谱线 Ar X VI (35.39 nm), 并获得两者强度随时间的变化。其中, Ar II 和 Ar X VI 的电离能分别为 27 和 918 eV, 因此, Ar II 和 Ar X VI 分别对应分布于等离子体边界和芯部 Ar 离子。为了分析二者谱线强度随时间变化的特征, 发展了一种基于正则 Pearson 积矩相关系数的相关分析方法, 计算得到两者谱线强度变化的相对延迟时间, 以此表征杂质从边界向芯部输运的时间。结果显示, 偏滤器注入 Ar 杂质后, 芯部 Ar X VI 辐射增长滞后于边界 Ar II 辐射的增长, 并且在具有较高的低杂波加热功率的放电中, 两者的延迟时间较长, 表明较高的低杂波加热功率可以延长杂质从边界向芯部输运的时间。

关键词 杂质注入; 延迟时间; 相关分析; EAST 托卡马克

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)11-3507-05

引言

偏滤器是托卡马克装置主要的部件之一, 其主要功能是屏蔽来自第一壁的杂质, 排来自芯部的热流、粒子流以及聚变反应产生的氦灰^[1]。对于稳态运行的 ITER 装置, 到达偏滤器靶板表面的热负荷将超过 100 MW·m⁻²^[2], 远高于目前面向等离子体材料可承受的极限(<10 MW·m⁻²)^[3]。因此, 将来 ITER 运行时需要向偏滤器注入杂质气体, 使来自上游的高温等离子体在到达靶板前通过辐射冷却。氖(Ne)、氩(Ar)等惰性气体由于在较低的等离子体温度下具有较高的辐射效率和极低的与材料反应几率, 将用作 ITER 边界等离子体的辐射杂质。ASDEX-Upgrade^[4]、JET^[5]、DII I-D^[6]和 EAST^[7]上的实验表明 Ne 和 Ar 等杂质可以有效地增强偏滤器区域的能量辐射, 从而降低偏滤器靶板热负荷或实现等离子体脱靶。

然而, 边界注入的杂质粒子通过扩散和等离子体中的输

运, 部分进入到等离子体芯部^[8], 增强了芯部能量辐射, 降低等离子体约束性能, 同时也会稀释聚变燃料。认识和理解托卡马克中边缘杂质向等离子体芯部的输运过程是有效控制主等离子体杂质污染的前提基础。在 EAST 偏滤器 Ar 杂质充气实验中, 采用偏滤器可见光谱和芯部极紫外光谱系统分别探测并识别 Ar 杂质在偏滤器的低电离态辐射谱线(Ar II)和在芯部的高电离态辐射谱线(Ar X VI), 提出了一种新的相关分析方法来计算得到两者之间的延迟时间, 用来表征杂质从边界到芯部的特征输运时间, 并分析了不同低杂波加热功率对延迟时间的影响。

1 实验部分

1.1 EAST 托卡马克

EAST 是我国研制的非圆截面超导托卡马克装置^[9], 装置大半径 1.7~1.9 m, 小半径 0.4~0.45 m, 最大纵场 3.5 T, 等离子体电流可达 1 MA, 旨在实现高功率长脉冲稳态等

收稿日期: 2021-08-23, 修订日期: 2022-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0402501, 2017YFE0301300, 2018YFE0303103), 国家自然科学基金项目(U19A20113, 11922513, 11875287)和中国科学院与日本学术振兴会共同研究资助项目(GJHZ201984)资助

作者简介: 叶大为, 1993 年生, 中国科学院等离子体物理研究所, 中国科学技术大学硕士研究生 e-mail: dawei.ye@ipp.ac.cn

* 通讯作者 e-mail: fding@ipp.ac.cn

离子体运行。2014 年 EAST 装置升级改造后^[10], 面向等离子体部件主要包括上部钨偏滤器、下部石墨偏滤器以及主腔室器壁上的钨瓦。EAST 在上、下偏滤器的内外靶板各设有一套充气系统。通过改变充气口后端压电阀的脉冲电压、占空比、频率等参数, 可以调节杂质充气速率。本文只利用上外靶板的充气口进行杂质的注入实验, 充气口位置如图 1 所示。EAST 上偏滤器安装了 54 组三探针测量系统^[11], 分别位于 O 和 D 窗口, 沿靶板的空间分辨率约为 12~18 mm, 可以提供上外靶板表面等离子体的电子密度, 电子温度, 粒子和热通量等信息。本文使用上偏滤器探针监测杂质充气前后外靶板电子温度随时间的变化。EAST 中平面 D 窗口搭建了一套快速极紫外(extreme ultraviolet, EUV)光谱系统^[12], 其观测弦穿过主等离子体(图 1), 可用于测量 2~50 nm 波段范围内高电离态杂质粒子的辐射信号, 时间分辨可达 5 ms。本文使用了 Ar^{15+} 辐射谱线 Ar X VI (35.39 nm), 其电离能为 918 eV, 主要存在于磁分界面(图 1 蓝色曲线)以内的芯部区域。

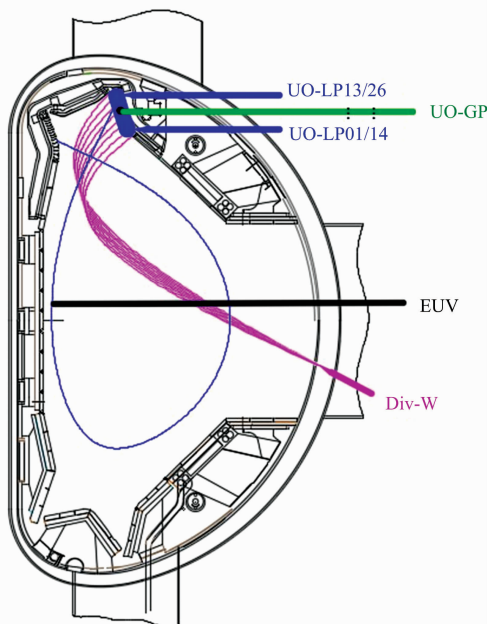


图 1 部分 EAST 诊断及其光路示意图

Div-W(品红): 上钨偏滤器可见光谱系统(品红色曲线为光路在截面上的投影); EUV(黑色): 芯部极紫外光谱; UO-LP(蓝色): 上钨偏滤器外靶板 Langmuir 探针; UO-GP(绿色): 上钨偏滤器外靶板充气口; 蓝色实线是主等离子体与边界等离子体的磁分界面

Fig. 1 Geometry of viewing chords for the relevant diagnostics on EAST

Div-W (magenta): divertor visible spectroscopy system viewing the upper outer (UO) tungsten divertor target; EUV (black): extreme ultraviolet spectrometer viewing the core plasma; UO-LP (blue): divertor Langmuir probes at the UO target; UO-GP (green): gas puff inlet at the UO target. A typical separatrix of the main plasma is also shown with the blue line

1.2 EAST 偏滤器可见光谱系统

实验中采用偏滤器可见光谱系统(divertor visible spec-

troscopy system, Div-W) 监测偏滤器靶板附近杂质线辐射^[13], 系统结构如图 2 所示。其观测透镜位于 EAST 装置 H 窗口中平面处, 可以收集 L 段的上外偏滤器靶板附近的等离子体可见波段(380~700 nm)光谱信息, 其观测范围覆盖整个偏滤器靶板, 在极向上共设置了 22 个观测点, 相邻两个观测点的间距约为 13 mm, 环向上设置了 3 列光路, 间距 25 mm。光学透镜组收集的光信号通过光纤传输给 Czerny-Turner 结构的光谱仪, 分光后的光谱信息由 CCD 相机进行采集。系统使用的光纤长度约 40 m, 可以将光信号传输到远离装置的低辐射区, 减小放电时磁场和辐射对采集仪器的影响。实验中光谱仪狭缝宽度为 30 μm , 光栅刻线密度为 1 200 $\text{g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。采用背照式大像面电子倍增 CCD(electron multiplying charge coupled device, EMCCD)探测器记录光谱仪输出的谱线信息, 在 16 个通道同时测量条件下, 其曝光时间为 5 ms。

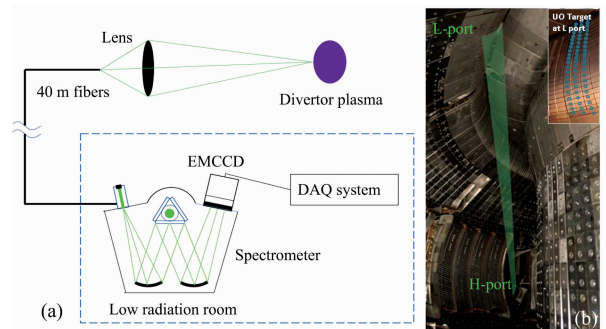


图 2 EAST 上钨偏滤器可见光谱系统

(a): EAST 上钨偏滤器可见光谱原理图;

(b): EAST 真空室内上外靶板观测光路示意图

Fig. 2 Divertor visible spectroscopy system on EAST

(a): Schematic diagram of Div-W system; (b): Light path diagram viewing the UO divertor target in EAST vacuum chamber

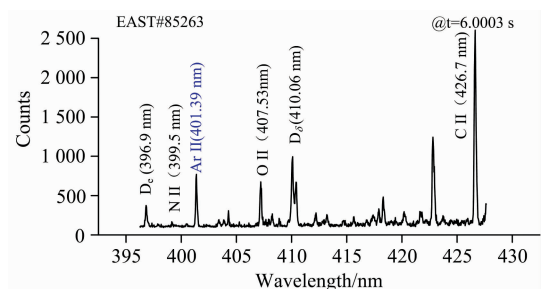


图 3 偏滤器可见光谱系统测量的典型光谱图

Fig. 3 Typical spectra measured by divertor visible spectroscopy system

实验中光谱仪观测波段范围设置为 396.4~427.8 nm。图 3 是偏滤器 Ar 杂质注入放电中偏滤器可见光谱测量的典型光谱图, 可以观测到 C II, N II, O II 和 Ar II 等低电离态杂质辐射谱线。较强的 C II (426.7 nm) 信号与下偏滤器和限制器表面使用的石墨瓦有关, 这些位置的石墨瓦受到高温等离子体轰击, 被刻蚀出的碳原子经过输运和迁移到达上偏滤器。O II (407.53 nm) 和 N II (399.5 nm) 信号来自于真空

残留的少量空气。此外,可以利用 $D_{\alpha}(7-2)$ 和 $D_{\beta}(6-2)$ 谱线用来评估偏滤器区域燃料粒子循环及等离子体状态。本文使用该系测量 Ar^{1+} 谱线 $Ar II(401.36 \text{ nm})$ 的强度随时间演化, Ar^{1+} 电离能为 27 eV, 主要分布于偏滤器靶板附近。

1.3 光谱信号的相关分析方法

为了定量评价偏滤器和芯部等离子体中杂质辐射谱线的联系,提出了一种基于正则 Pearson 积矩相关系数(ρ)的相关分析方法^[14],利用该方法可以得到芯部和偏滤器中杂质线辐射光谱强度变化的时间延迟及其最大相关系数。图 4(a)显示了上单零放电 #85265 中,芯部 $Ar X VI$ 和偏滤器 $Ar II$ 辐射信号随时间的演化。3 s 时从上偏滤器外靶板注入 Ar/D_2 混合气体(体积比 $Ar:D_2=1:1$), $Ar II$ 和 $Ar X VI$ 的线辐射信号均先后出现上升,并且两者强度变化之间存在时间上的延迟。利用相关性系数[式(1)]可以计算 3~4.5 s 期间 $Ar II$ 和 $Ar X VI$ 之间的 Pearson 相关系数 ρ 。

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

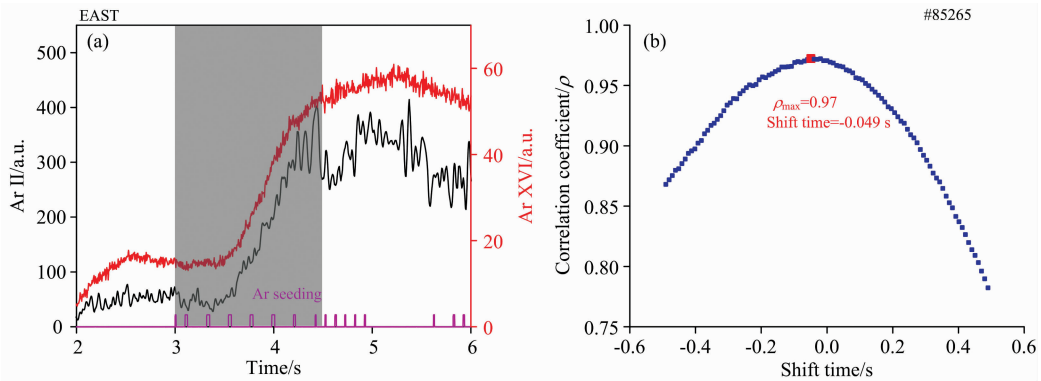


图 4 (a): 偏滤器 $Ar II$ (黑色)和芯部 $Ar X VI$ (红色)辐射信号强度随时间演化,品红色脉冲是充气压电阀的电压控制信号; (b): 通过时间平移(a)图中的 $Ar X VI$ 信号得到 $Ar X VI$ 谱线与 $Ar II$ 谱线的相关系数 ρ 对平移时间的依赖关系,选取谱线上升时间段 3~4.5 s(图 a 中阴影区)计算相关系数

Fig. 4 (a): Temporal evolutions of $Ar II$ line emission from the upper divertor (black), $Ar X VI$ line emission from the core plasma (red) and the voltage signal of piezo valve for Ar seeding (magenta); (b): Correlation coefficient ρ as a function of shift time between the $Ar X VI$ and the $Ar II$ signal; The rising time period of the spectral lines [3~4.5 s indicated by the shaded area in Fig. 4 (a)] is used to calculate the correlation coefficient

2 结果与讨论

图 5 给出了不同低杂波(lower hybrid wave, LHW)加热功率条件下两次放电(#85263 和 #85272)主要的等离子体参数。#85263 和 #85272 放电都是上单零位形,除了 4.6 GHz LHW 功率外其他实验参数和等离子体参数基本相同:纵场 $B_z=2.3 \text{ T}$,等离子体电流 $I_p=400 \text{ kA}$ [图 5(a)],弦平均电子密度 $n_e=5.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 2.45 GHz LHW 功率 0.5 MW,离子回旋加热功率 0.5 MW, 3 s 开始由上偏滤器注入 Ar/D_2 混合气体(体积比 $Ar:D_2=1:1$)。#85263 放电中 4.6 GHz LHW 加热功率为 $P_{4.6 \text{ GHz}}=1.5 \text{ MW}$, 而 #85272 放电中 4.6 GHz LHW 加热功率为 $P_{4.6 \text{ GHz}}=2.5 \text{ MW}$ [图 5(b)]。可以看到,在第一个 Ar 充气电压脉冲约 0.4 s 之后,

式(1)中, X 和 Y 为随机变量, $\text{cov}(X, Y)$ 为随机变量 X 和 Y 的协方差, σ_X 和 σ_Y 为 X 和 Y 的标准差。这里我们取 $Ar II$ 和 $Ar X VI$ 信号强度作为两组变量 X 和 Y , 计算 $Ar II$ 和 $Ar X VI$ 两组数据之间的相关系数。保持 $Ar II$ 信号不变,将 $Ar X VI$ 信号进行时间平移,每次移动时间步长为 5 ms, 移动范围为 $-500 \sim 500 \text{ ms}$ 。对应每次时间平移,重新计算 $Ar II$ 信号和 $Ar X VI$ 信号之间相关系数 ρ , 最终得到一组相关系数值与平移时间的函数关系,如图 4(b)所示。当两个信号的上升起始时刻重合时,即在时间轴上的同一位置时,两个信号的相关性最好,得到的相关系数最大。图 4(b)最大相关系数(红点)为 0.97, 对应的平移时间为 -49 ms , 表示 $Ar X VI$ 信号向左移动了 49 ms, 即芯部等离子体中 $Ar X VI$ 信号的增长滞后于偏滤器中 $Ar II$ 信号约 49 ms。在本文以下部分,将这个最大相关系数对应的时间轴偏移的绝对值定义为这两个信号之间的延迟时间(τ_{delay})。延迟时间可以表征杂质从偏滤器输运到主等离子体所需的特征时间。

边界 $Ar II$ 和芯部 $Ar X VI$ 信号都开始上升[图 5(c)和(d)],但芯部 $Ar X VI$ 谱线强度开始上升的时间相对于偏滤器 $Ar II$ 谱线存在明显的延迟,表明充入的 Ar 先后进入了偏滤器和芯部。此处 0.4 s 的时间延迟是由于气体在充气管道中的扩散导致的。随着 $Ar II$ 信号的上升,偏滤器靶板电子温度也开始下降[图 5(e)],表明充入的 Ar 杂质增强了偏滤器等离子体辐射,从而降低了到达靶板的粒子能量。

图 6(a)给出了 #85263 和 #85272 两次放电中的 $Ar X VI$ 与 $Ar II$ 相关系数对平移时间的依赖关系。两次放电中最大相关系数对应的平移时间的绝对值即延迟时间 τ_{delay} 分别是 37 ms(#85263)和 69 ms(#85272),表明较高的低杂波加热功率条件下,芯部与边界杂质谱线之间的时间延时也较大。图 6(b)中显示了不同 LHW 加热功率放电实验中延迟时间的统计结果,这些放电中,除 4.6 GHz LHW 加热功率不

同外,其他放电参数基本一致。可以看到,2.5 MW 4.6 GHz LHW 加热功率实验中的芯部与边界杂质光谱延迟时间明显大于 1.5 MW 4.6 GHz LHW 加热功率实验,与图 6(a)两次放电的对比结果一致。图 5(e)显示了较高 LHW 加热放电中,偏滤器靶板电子温度较高。较高的偏滤器电子温度可以减小注入杂质的平均电离长度,增强磁场对杂质离子的约束作用,延长了杂质粒子从边界向芯部的输运时间。

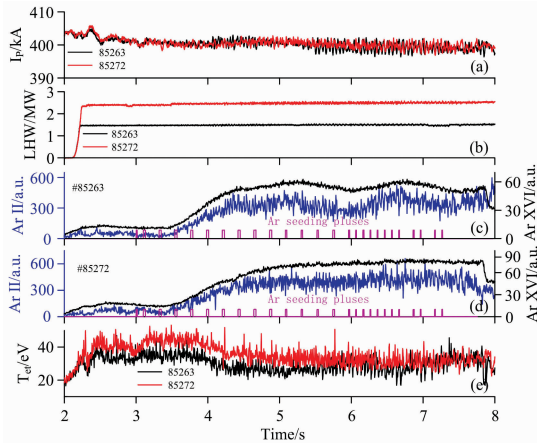


图 5 #85263 和 #85272 放电中主要等离子体参数随时间变化

(a): 等离子体电流 I_p ; (b): 4.6 GHz 低杂波(LHW)加热功率; (c): #85263 放电中偏滤器 Ar II 谱线、芯部 Ar X VI 谱线和充气压电阀的电压信号; (d): #85272 放电中偏滤器 Ar II 谱线、芯部 Ar X VI 谱线和充气压电阀的电压信号; (e): 偏滤器靶板电子温度 (T_{et})

Fig. 5 Time traces of main plasma parameters of discharge #85263 and #85272

(a): Plasma current I_p ; (b): Power of 4.6 GHz LHW (c): Ar II line emission detected by Div-W, Ar X VI line emission detected by EUV and the voltage signal of piezo valve for Ar seeding in shot #85263; (d): Ar II emission detected by Div-W, Ar X VI emission detected by EUV and the voltage signal of piezo valve for Ar seeding in shot #85272; (e): Electron temperature (T_{et}) near the outer strike point of the upper divertor

3 结论

在 EAST 上利用偏滤器可见光谱系统识别和监测杂质在边界低电离态的辐射谱线,通过极紫外光谱系统获得杂质在芯部高电离态的辐射谱线。在偏滤器 Ar 杂质注入实验中发现,Ar 杂质在芯部高电离态谱线(Ar X VI)强度的变化相对于在边界低电离态谱线(Ar II)的强度变化存在时间延迟。为此,发展了一种相关分析方法计算得到两者的延迟时间,

References

- [1] Pitcher C S, Stangeby P C. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1997, 39(6): 779.
- [2] Reimold F, Wischmeier M, Bernert M, et al. Nuclear Fusion, 2015, 55(3): 033004.
- [3] Pitts R A, Carpentier S, Escourbiac F, et al. Journal of Nuclear Materials, 2011, 415(1): 957.
- [4] Sytova E, Pitts R A, Kaveeva E, et al. Nuclear Materials and Energy, 2019, 19: 72.

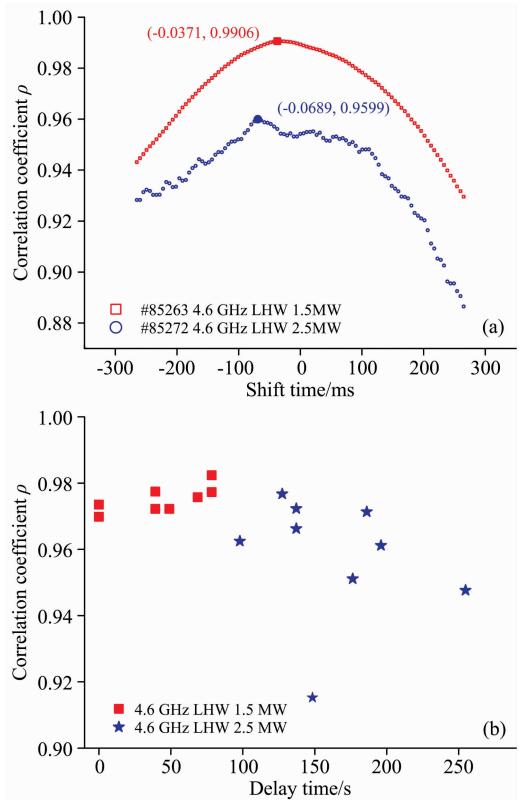


图 6 (a): 对应图 5 不同 4.6 GHz LHW 加热功率的两次放电中(#85263 和 #85272), Ar II 与 Ar X VI 之间的相关系数 ρ 与平移时间的关系; (b): 最大相关系数 ρ 与对应延迟时间之间的统计关系,红色点是 4.6 GHz LHW 功率为 1.5 MW 的放电,蓝色点代表 4.6 GHz LHW 功率为 2.5 MW 的放电,其他放电参数基本相同

Fig. 6 (a): The correlation coefficient ρ between the Ar II signal and the Ar X VI signal as a function of shift time of two typical discharges (#85263 and #85272) with different 4.6 GHz LHW powers; (b): Scatter graph between the maximum correlation coefficient ρ and the corresponding delay time in the similar discharges except for with different 4.6 GHz LHW powers, red for $P_{4.6 \text{ GHz}}=1.5 \text{ MW}$ and blue for $P_{4.6 \text{ GHz}}=2.5 \text{ MW}$

用来反映杂质从边界向芯部扩散输运过程的快慢。对比了不同 4.6 GHz 低杂波加热功率对延迟时间的影响,发现提高低杂波功率可以延长杂质从边界向芯部输运所需要的时间,这个现象可能与较高 LHW 加热功率下具有较高的偏滤器电子温度有关。

- [5] Huber A, Wischmeier M, Bernert M, et al. *Physica Scripta*, 2020, T171: 014055.
- [6] Wang H Q, Guo H Y, Petrie T W, et al. *Nuclear Materials and Energy*, 2017, 12: 942.
- [7] Xu G S, Yuan Q P, Li K D, et al. *Nuclear Fusion*, 2020, 60(8): 086001.
- [8] Stangeby P C, Moulton D. *Nuclear Fusion*, 2020, 60(10): 106005.
- [9] Wan Y X, HT-7 Team, HT-7U Team. *Nuclear Fusion*, 2000, 40(6): 1057.
- [10] Zhou Z B, Yao D M, Cao L. *Journal of Fusion Energy*, 2015, 34(1): 93.
- [11] Xu J C, Wang L, Xu G S, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(8): 083504.
- [12] ZHANG Peng-fei, ZHANG Ling, XU Zong, et al(张鹏飞, 张 凌, 许 棕, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2016, 36(7): 2134.
- [13] Mao H M, Ding F, Luo GN, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(4): 043502.
- [14] Gibbons J D, Chakraborti S. *Nonparametric Statistical Inference*. 6th ed. New York: Chapman and Hall, 2011.

Study on Time Delay of Impurity Line Emissions Between in the Edge and Core Plasmas in EAST Tokamak

YE Da-wei^{1, 2}, DING Fang^{1*}, LI Ke-dong^{1, 2}, CHEN Xia-hua^{1, 2}, LUO Yu^{1, 2}, ZHANG Qing^{1, 2}, MENG Ling-yi^{1, 2}, LUO Guang-nan^{1, 2}

1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract Impurity seeding is considered a promising method to enhance edge plasma radiation and mitigate the head load on the vessel surface in the future tokamak devices like ITER. However, part of the injected impurities would inevitably be transported to the plasma core, causing strong core radiation loss and degrading plasma confinement. Spectral observation is an important means to obtain the information on impurity species, concentration and distribution in tokamak which plays an important role in understanding the impurity transport in plasma. During the EAST (experimental advanced superconducting tokamak) diverter Ar seeding experiments, the diverter visible spectroscopy (Div-W) system and the fast-response extreme-ultraviolet (EUV) spectroscopy system is used to detect the line emission of Ar¹⁺ (Ar II at 401.36 nm) in the edge and monitor the line emission of Ar¹⁵⁺ (Ar X VI at 35.39 nm) from plasma core, separately. Meanwhile, Ar II and Ar X VI intensities' time evolution is obtained. The different ionization energies for Ar II (27 eV) and Ar X VI (918 eV) indicate that Ar II and Ar X VI are mainly distributed at the plasma boundary and the core plasma respectively. A correlation analysis method based on regular Pearson product moment has been developed to derive the time delay between the two line emissions from the edge and the core plasma. The relative delay time of Ar II and Ar X VI is calculated to characterize the transport time of Ar impurities from the boundary to the core. The results show that the rise of Ar X VI line emission lags behind Ar II line emission after Ar injection in the diverter. Moreover, the delay time is longer in the discharges with higher lower hybrid wave (LHW) heating power, indicating that higher LHW power can prolong the transport time of impurities from the boundary to the core.

Keywords Impurity seeding; Delay time; Correlation analysis; EAST tokamak

(Received Aug. 23, 2021; accepted Mar. 21, 2022)

* Corresponding author