

# ICRF加热下EAST快离子损失速度空间分布初步研究

王书松<sup>1,2</sup> 黄娟<sup>2</sup> 常加峰<sup>2</sup> 张新军<sup>2</sup> 高伟<sup>2</sup> 付静<sup>3</sup> 孙延旭<sup>3</sup>  
史唱<sup>3</sup> 王曦辉<sup>3</sup> 张子欣<sup>3</sup>

1(安徽大学 合肥 230601)

2(中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所 合肥 230031)

3(中国科学技术大学 合肥 230026)

**摘要** 基于闪烁体的快离子损失探针(Fast-Ion Loss Detector, FILD)能够测量损失快离子的速度空间分布,是研究核聚变装置中快离子损失控制机理的关键诊断手段。在东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)上,通过FILDSIM程序在诊断图像与速度空间分布之间建立桥梁,将诊断探测到的信号转化为速度空间分布,获得了离子回旋共振加热(Ion Cyclotron Resonance Heating, ICRH)条件下的快离子损失速度空间分布,为进一步评估和控制离子回旋共振加热下的快离子损失奠定了基础。另外,通过损失快离子反向追踪,探究了探头本体遮挡对诊断探测范围的影响,为损失诊断系统进一步升级提供了依据。

**关键词** 快离子损失诊断, FILDSIM, 离子回旋共振加热, 速度空间分布

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120601

## Preliminary study of velocity-space distribution of fast-ion loss under ion cyclotron resonance heating in the EAST

WANG Shusong<sup>1,2</sup> HUANG Juan<sup>2</sup> CHANG Jiafeng<sup>2</sup> ZHANG Xinjun<sup>2</sup> GAO Wei<sup>2</sup> FU Jing<sup>3</sup>  
SUN Yanxu<sup>3</sup> SHI Chang<sup>3</sup> WANG Xihui<sup>3</sup> ZHANG Zixin<sup>3</sup>

1(Anhui University, Hefei 230601, China)

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

3(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** [Background] Scintillator-based fast-ion loss detector (FILD) can measure the velocity-space distribution of fast-ion loss and are key in studying the control mechanism of fast-ion loss in nuclear fusion devices. [Purpose] This study aims to obtain the velocity-space distribution of fast-ion loss from corresponding FILD data and evaluate the capacity of current FILD probe for the further improvement of diagnostic design. [Methods] The FILDSIM code was employed to establish the linkage between the fast-ion image digitized by FILD and the velocity-space distribution of fast-ion loss. The detection coverage of fast ions on the scintillator was assessed through reverse tracing of the lost fast ions, considering the geometry of the FILD probe as well as the pitch angle and gyroradius of

国家重点研发计划(No.2019YFE03020004)、国家自然科学基金(No.11975276)资助

第一作者: 王书松, 男, 1996年出生, 2019年毕业于烟台大学, 现为硕士研究生, 研究领域为等离子体物理

通信作者: 黄娟, E-mail: [juan.huang@ipp.ac.cn](mailto:juan.huang@ipp.ac.cn)

收稿日期: 2023-03-17, 修回日期: 2023-05-30

Supported by the Project National Key Research and Development Program of China (No.2019YFE03020004), National Natural Science Foundation of China (No.11975276)

First author: WANG Shusong, male, born in 1996, graduated from Yantai University in 2019, master student, focusing on plasma physics

Corresponding author: HUANG Juan, E-mail: [juan.huang@ipp.ac.cn](mailto:juan.huang@ipp.ac.cn)

Received date: 2023-03-17, revised date: 2023-05-30

fast ions entering the pinhole of the FILD probe. **[Results]** The obtained velocity-space distribution of fast-ion loss under ICRH indicates that the energy of lost fast hydrogen minority ions is above 200 keV. Moreover, analysis shows that the geometry of the probe, particularly the shell behind the scintillator, obstructs the diagnostic detection range, creating a null region on the scintillator. **[Conclusions]** The acquisition of the velocity-space distribution of fast-ion loss lays the foundation for further evaluation and control of fast-ion loss under ion cyclotron resonance heating. In addition, the investigation of the probe detection range provides a basis for upgrading diagnostic systems.

**Key words** Fast-ion loss detector (FILD), FILDSIM, Ion cyclotron resonance heating (ICRH), Velocity-space distribution

当前,聚变装置中的快离子主要是通过辅助加热手段(例如中性束加热和离子回旋共振加热<sup>[1]</sup>)产生的,并且这些加热手段也导致了不同来源的快离子损失。这些快离子损失不仅会降低辅助加热效率和等离子体约束性能,还可能对装置第一壁造成损害<sup>[2]</sup>,因此,研究快离子损失是十分必要的。快离子速度空间分布可以区分损失快离子的来源及损失机制,是研究快离子损失的关键。快离子损失探针(Fast-Ion Loss Detector, FILD)诊断可以同时测量损失快离子的回旋半径(Gyroradius)和俯仰角(Pitch-angle),从而得到快离子损失的速度空间分布。快离子损失诊断于1990年首次被应用在美国普林斯顿的托卡马克装置(Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR)<sup>[3]</sup>中,目前已经在国内外多个装置中推广,包括美国原子能机构的国家核聚变装置(National Fusion Facility, DIII-D)<sup>[4]</sup>、德国的轴对称偏滤器核聚变装置(ASDEX Upgrade, AUG)<sup>[5]</sup>、英国的环形托卡马克装置(Joint European Torus, JET)<sup>[6]</sup>、韩国的超导托卡马克先进研究装置(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, KSTAR)<sup>[7]</sup>和中国核工业西南物理研究院的环流器二号(HL-2A)<sup>[8]</sup>等。基于快离子损失探针诊断,国内外各大装置均对不同辅助加热手段产生的快离子速度空间分布进行了广泛研究,例如, KSTAR研究了不同中性束(Neutral Beam Injection, NBI)第一轨道损失的俯仰角的差异<sup>[9]</sup>。AUG展示了离子回旋加热(Ion Cyclotron Resonance Heating, ICRH)与NBI加热损失快离子的回旋半径与俯仰角不同<sup>[10]</sup>。为了获得准确的快离子损失的速度空间分布, AUG上开发了针对快离子损失探测器的轨道追踪程序FILDSIM, FILDSIM目前已经在ASDEX Upgrade<sup>[11]</sup>、MAST-U<sup>[12]</sup>、Wendelstein 7-X stellarator (W7-X)<sup>[13]</sup>等多个聚变装置上应用。

作为全超导的托卡马克实验装置,东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)上安装了多套辅助加热系统,包括中性束加热系统、离子回旋加热系统、低杂波加热系统等。随

着辅助加热系统加热水平的提高,快离子物理研究也越发凸显其重要性。EAST的快离子损失探针观察到了快离子的广泛存在,如在不同加热方式(NBI与ICRH)、正反磁场、顺电流与逆电流条件下均探测到快离子损失信号。该诊断也支持了相关的物理研究,分析了共振磁扰动、边界局域模及快电子对快离子损失信号的影响<sup>[14-17]</sup>。

为了获得更精确的快离子损失速度空间分布,本文利用FILDSIM程序计算回旋半径与俯仰角的匹配网格,相比于直接通过探头准直孔与准直缝中心的粒子轨道得到的匹配网格,降低了误差,提高了结果的准确性。并以此为基础,计算得到了ICRH条件下快离子损失的速度空间分布,本文也分析了探头本体遮挡(self-obstructed)<sup>[12]</sup>对快离子损失测量的影响,为进一步改进探头几何结构提出了方案。

## 1 快离子损失诊断系统

### 1.1 诊断介绍

EAST上快离子损失探针诊断安装在J窗口中平面偏上的位置,环向位置如参考文献[14]中图2所示,诊断系统主要分为4个部分:探测系统、驱动系统、成像光路系统以及数据采集系统<sup>[17]</sup>,详细的探头结构如图1所示。在磁场作用下,损失快离子做拉莫尔回旋运动,具有特定能量与俯仰角的损失快离子依次通过探头的准直孔、准直缝,打击到闪烁屏上,然后在打击点处激发荧光,根据发光点的位置可以得到闪烁体处快离子的速度空间分布。实验中通过电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)和图像传感器高速相机(Phantom V2010)记录闪烁体屏上的荧光图像,得到损失快离子的回旋半径及俯仰角的信息。由于探头准直孔与准直缝有限尺寸的限制,以及离子初始位置和相位具有随机性,具有单一能量与俯仰角的损失快离子打击到闪烁体屏上时,会形成一个分布。因此直接通过准直孔与准直缝中心确定快离子的回旋半径与俯仰角是不准确的,需要在准直孔处和闪烁体处的速度空间分布之

间建立桥梁, FILDSIM 程序应运而生<sup>[18]</sup>。

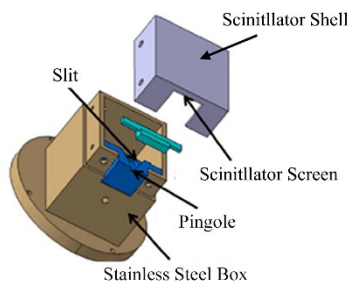


图1 快离子损失探针探头的三维结构图<sup>[14]</sup>  
Fig.1 3D structure diagram of the FILD probe head in EAST<sup>[14]</sup>

## 1.2 FILDSIM 模拟程序

FILDSIM 是由 Joaquin 等<sup>[18]</sup>开发的一种 Monte Carlo 轨道追踪程序, 用来计算 FILD 探头结构内粒子的运动轨道。通过轨道追踪可以在探头准直孔处的损失快离子速度空间分布和闪烁体处的损失快离子速度空间分布之间建立桥梁, 获得更加准确的损失快离子速度空间分布。FILDSIM 轨道计算的输入量是准直孔测试粒子回旋半径、俯仰角、初始位置、相位等信息, 输出量是闪烁体处测试粒子的位置、能量和俯仰角、准直因子、相位等信息。具有相同回旋半径与俯仰角的测试粒子在闪烁体屏的打击点位置是一个分布, FILDSIM 以这个分布的质心作为打击点的匹配位置。这样就将速度空间的一个点与闪烁体打击点匹配位置一一对应, 然后通过插值的方法将闪烁体位置空间转化为速度空间。不同回旋半径与俯仰角的打击点匹配位置连线可以得到打击点匹配图。如图2所示, 将闪烁体打击点匹配图匹配到 CCD 图像上, 就可以获得 FILD 诊断 CCD 图像所对应的回旋半径与俯仰角。图2展现的是纵场 ( $B_z$ ) 与等离子体电流 ( $I_p$ ) 同向时, 在装置俯视图均为逆时针的打击点匹配图, 此时准直孔在闪烁体中下方, 外侧的方框为闪烁体边界, 方框内的网格表示不同回旋半径与俯仰角的测试粒子打击到闪烁体上所对应的位置, 其中回旋半径是 1~12 cm, 间隔为 1 cm, 俯仰角是 50°~140°, 间隔为 10°。

需要注意的是这里的回旋半径并不是粒子真实的回旋半径, 而是将其转化为平行于磁场方向的速度 ( $v_{\parallel}$ ) 为 0 时的回旋半径, 这样回旋半径就与能量直接相关。由于探头准直孔、准直缝、闪烁体屏与纵场平行, 快离子绕聚变装置的总磁场做拉莫尔回旋运动, 因此打击点匹配图中 90° 位置与闪烁体外框并非平行与垂直的关系, 而是倾斜的。由图2可知, 随着回旋半径逐渐增大, 相邻回旋半径匹配位置的间隔逐渐减小, 这意味着回旋半径越大, FILD 诊断的分

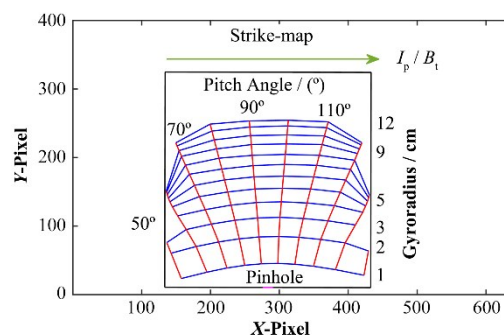


图2 快离子损失探针诊断闪烁体打击点匹配图  
Fig.2 Strike-map of FILD scintillator

辨率越差。并且随着回旋半径的增大, 探头能够探测到的俯仰角范围减小。通过计算得出闪烁体的回旋半径分布呈现出斜高斯分布, 俯仰角分布呈现出高斯分布, 使得回旋半径越大分辨率越差, 这与 ASDEX Upgrade 装置的结果一致<sup>[18]</sup>。由于离子回旋共振加热产生的快离子能量较高, 因此分辨率的研究对于准确获得离子回旋共振加热条件下的损失快离子速度空间分布具有重要意义。

## 2 离子回旋共振加热下的快离子损失

### 2.1 离子回旋共振加热条件下的损失快离子速度空间分布

离子回旋共振加热是 EAST 上重要的辅助加热手段<sup>[19]</sup>, 离子回旋加热条件下往往能产生能量很高的快离子, 这些快离子如果损失到最外闭合磁面以外不仅会降低加热效率, 还会损害装置第一壁。图3展示了 EAST 上第 85624 次放电的主要参数随时间演化的信息, 从上到下分别为等离子体电流  $I_p = 400$  kA, 纵场  $B_z = 2.4$  T, 离子回旋共振加热功率  $P_{ICB} = 0.33$  MW,  $P_{ICJ} = 0.74$  MW, 以及中性束加热的束能:  $E_{NB1L} = 47$  keV,  $E_{NB2L} = 44$  keV,  $E_{NB2R} = 45$  keV。选取时刻点 8.04 s 的 FILD 诊断 CCD 信号进行分析, 此时只有离子回旋共振加热, 无中性束加热。如图4所示, 通过 FILDSIM 轨道追踪获得了 FILD 诊断 CCD 图像所对应的回旋半径与俯仰角。图4中箭头表示纵场与等离子体电流的方向相同, 与文献[14]中图2的纵场方向相反, 准直孔位于闪烁体中心位置。快离子损失信号经过光学系统传输到达 CCD 上显示的是真实图像的镜像, 所以小于 90° 的一支表示快离子顺电流方向运动, 大于 90° 的一支表示快离子逆电流方向运动。

在 §1.2 中已经介绍通过 FILDSIM 计算可以将速度空间的网格点与闪烁体的打击点位置一一对应, 但测试粒子数量毕竟是有限的, 为了节省运算



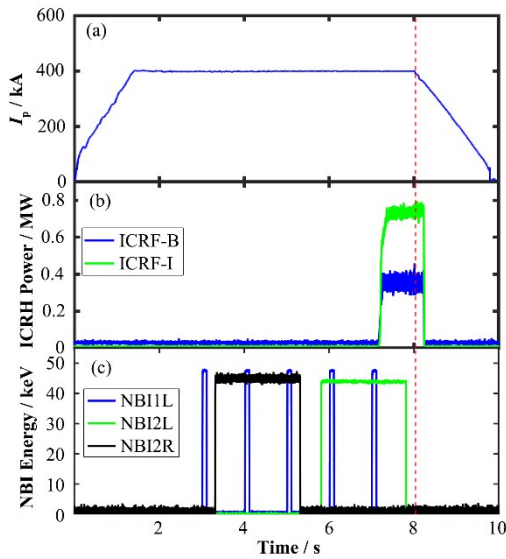


图3 第85624次放电主要参数随时间演化的信息  
Fig.3 Temporal evolution of main parameters for discharge #85624

量,可以根据速度空间网格点与闪烁体打击点的对应关系,通过二维插值的方法将闪烁体的所有打击点位置匹配到相空间,二维插值函数采用的是 Interactive Data Language 程序中的 trigrd 函数。将图4中的快离子损失信号经过二维插值的方法转换到相空间,可以获得直观的损失快离子回旋半径-俯仰角分布,如图5(a)所示。本次放电的氘氚比约为4.5%,离子回旋主要加热的是少数氢,探头附近的磁场约为1.9 T,结合回旋半径与能量的对应关系,

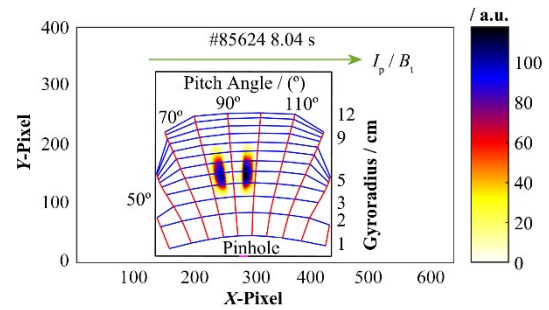


图4 第85624次放电8.04 s ICRH时快离子损失信号的相空间匹配图

Fig.4 Velocity-space strike-map of fast-ion loss signal under ion cyclotron resonance heating (ICRH) at 8.04 s for discharge #85624

可以得到损失快离子的能量-俯仰角分布,如图5(b)所示。由图5可知,顺电流和逆电流两个方向的损失信号相对于90°基本是对称的,并且损失信号的俯仰角在80°~100°,符合离子回旋共振加热主要提高垂直方向速度的预期,且与离子回旋少数加热生成的快离子在速度空间的二维分布是一致的<sup>[20]</sup>。损失快离子的回旋半径在3.5~7 cm范围内,则氢少子的能量在200~800 keV,信号最强位置的回旋半径约为4.5 cm,对应的氢离子的能量约为350 keV,由于特定回旋半径的损失快离子到达闪烁体后呈现斜高斯分布,且ICRH产生的快离子并不是单能的,准确损失快离子的能量范围需要通过层析反演才能确定<sup>[18]</sup>,FILDSIM的层析反演模块还在进一步发展过程中。

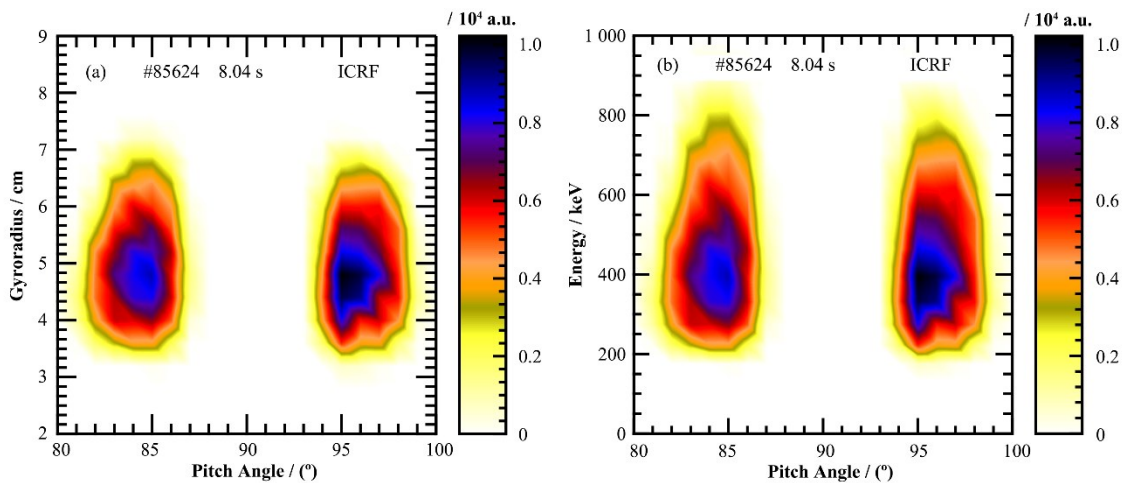


图5 第85624次放电离子回旋加热条件下损失快离子的速度空间分布  
(a)表示回旋半径-俯仰角分布,(b)表示能量-俯仰角分布

Fig.5 Velocity-space distributions of fast-ion loss under ICRH (a) Gyroradius vs. pitch angle, (b) Energy vs. pitch angle

## 2.2 探头本体遮挡对离子回旋加热下快离子损失信号的影响

由上一节可知,诊断测量的快离子损失信号包含逆电流与顺电流两个区域,但逆电流与顺电流损

失区域之间却没有明显的快离子损失信号,这与AUG装置模拟ICRH条件下快离子损失速度空间分布的结果有差异<sup>[21]</sup>。通过对探头几何结构的分析,猜测可能是有部分快离子损失信号被探头本体遮

挡。接下来将详细分析探头本体遮挡效应对快离子损失测量的影响。

探头本体遮挡指的是：由于探头本身三维结构的阻挡，具有某些能量与俯仰角的高能粒子无法被闪烁体屏接收。有些测试粒子在 FILDSIM 轨道追踪中虽然能够到达闪烁体屏上，但是通过反向追踪也会打到探头上，这部分粒子实际情况下无法到达闪烁体，因此无法被探头检测到。本体遮挡效应与快离子回旋半径、俯仰角，以及探头机械结构密切相关。当计算的快离子打击点位于靠近准直孔平面的闪烁体屏边界附近时（此时回旋半径是闪烁体可接收的最小半径），实物探头的准直孔所在平面边缘对快离子略有遮挡。当回旋半径更小时，快离子无法从准直孔到达闪烁体屏；当回旋半径更大时，准直孔所在平面不会遮挡快离子，而闪烁体屏的外壳有可能对快离子造成严重的遮挡。下文即是分析闪烁体屏外壳遮挡对快离子探测的影响。图6展示了两种典型粒子的轨道，实线表示这两种粒子的正向轨道，虚线为被遮挡粒子反向追踪时轨道，这种粒子的反向追踪轨道经过了闪烁体，因此这种粒子实际情况下无法被探头检测到。点线表示不会被遮挡的粒子的反向追踪轨道，这种粒子的反向追踪轨道不会经过闪烁体，可以在其他位置产生并且经过准直孔和准直缝，最终到达闪烁体屏，因此这种粒子在实验中可以被探头检测到。

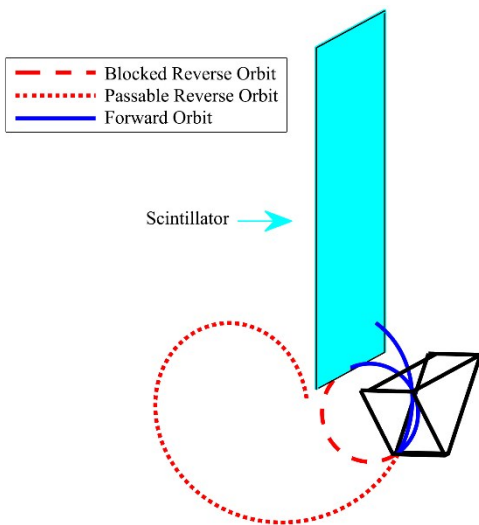


图6 探头本体遮挡示意图  
Fig.6 Diagram of probe self-obstructing effect

通过对 FILDSIM 轨道追踪中打到闪烁体屏的测试粒子反向追踪，得到了被遮挡的测试粒子分布（图7）以及未被遮挡的测试粒子分布（图8），这两个图中分布的强度表示被遮挡的严重程度，外侧的虚线为遮挡与未遮挡区域的边界，内侧的点线包围的

区域为遮挡较严重的区域。由图7可知，遮挡主要发生在俯仰角90°附近的区域，并且回旋半径越小遮挡越严重，这是因为平行方向速度( $v_{\parallel}$ )越小，回旋半径越小，反向追踪越容易打到闪烁体屏外壳上，而俯仰角与平行速度的关系为：

$$\text{Pitch-angle} = \arccos(v_{\parallel}/v) \quad (1)$$

因此，在俯仰角为90°附近遮挡最为严重。图7和图8展示了遮挡与未遮挡区域的大致边界，需要注意的是遮挡是一个渐变的过程，越靠近90°遮挡越强，图中虚线围成的边界表示遮挡区域的最大边界，此边界外的区域几乎不会被遮挡，而点线围成的边界内遮挡比较严重，虚线与点线边界之间也会被部分遮挡，当然根据遮挡程度的不同，可以画出很多个边界。由于在俯仰角为90°附近遮挡最为严重，而离子回旋共振加热主要提高的是垂直方向的速度，因此探头本体遮挡会对诊断获得的离子回旋加热下的快离子损失分布有重要影响。

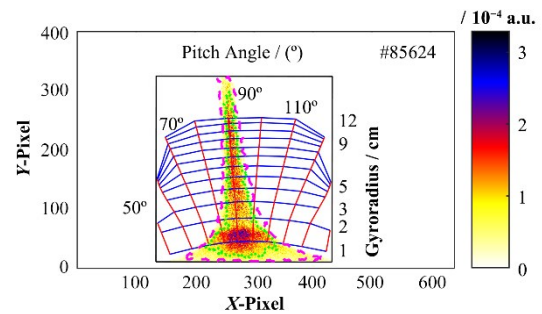


图7 第85624次放电遮挡背景下探头遮挡区域相空间匹配图

Fig.7 Velocity-space strike-map of probe blocked region in the background of blocked particle for discharge #85624

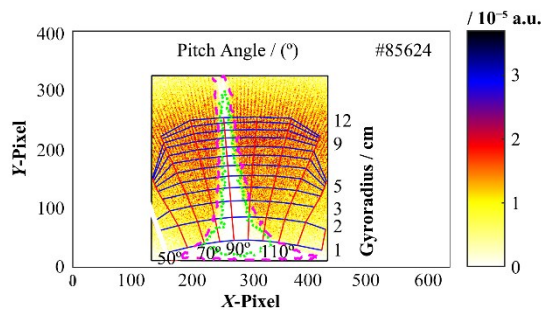


图8 第85624次放电未遮挡背景下探头遮挡区域相空间匹配图

Fig.8 Velocity-space strike-map of probe blocked region in the background of passable particle region for discharge #85624

图9展示了第85624次放电离子回旋共振加热条件下快离子损失信号的相空间匹配图及遮挡边界，由图9的损失信号边界可知，两部分损失信号靠近90°的边界有切除的痕迹，结合对探头本体遮挡情

况的分析,这两支信号靠近90°的部分很可能由于探头本体遮挡无法被探测到。图9中的虚线边界与点线边界分别对应图7中的两个边界,由外侧的虚线边界可知两支信号靠近90°的部分确实存在被遮挡的情况,由于越靠近90°遮挡越严重,两支信号之间的区域几乎无法探测到快离子损失信号。图10表示在探头可探测区域背景下的损失信号,可以看到CCD图像所展示的损失信号在探头可接收信号的范围。

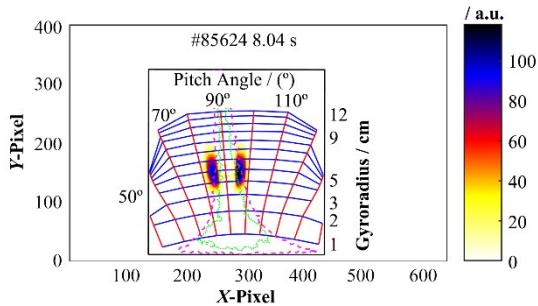


图9 第85624次放电离子回旋加热下快离子损失信号的相空间匹配图

Fig.9 Velocity-space strike-map of fast-ion loss signal under ICRH for discharge #85624

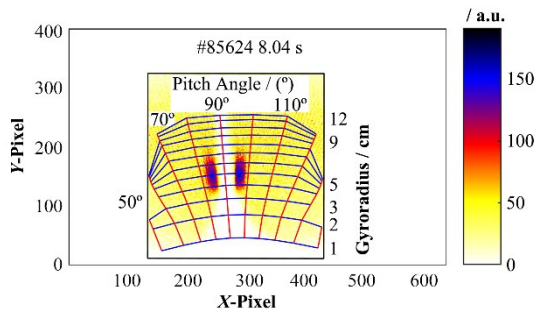


图10 第85624次放电探头未遮挡区域背景下离子回旋加热条件产生的快离子损失信号的相空间匹配图

Fig.10 Velocity-space strike-map of fast-ion loss signal under ICRH in the background of passable particle region for discharge #85624

虽然探头准直孔在中间可以同时观测到顺电流和逆电流方向的快离子损失,但这也导致探头靠近90°部分遮挡比较严重,无法得到完整的快离子损失的速度空间分布,因此快离子损失诊断系统后续升级的过程中,将考虑将探头准直孔由相对于闪烁体中间的位置移往两侧,以降低探头本体遮挡对诊断探测效果的影响。

### 3 结语

随着EAST上离子回旋共振加热系统性能的提高,离子回旋共振加热产生的快离子能量也越来越高,使用快离子损失探针诊断研究离子回旋共振加热条件下损失的快离子是十分必要的。本文运用

FIELDSIM轨道计算改进了快离子损失信号的数据处理方法,得到了更精确的ICRH加热下的快离子损失速度空间分布,探究了探头本体遮挡对快离子损失测量的影响,并提出改变探头准直孔的位置以降低探头本体遮挡带来的影响。接下来将结合ASCOT (Accelerated Simulations of Charged Orbits in Toroidal devices)等程序进一步模拟分析离子回旋共振加热条件下探头准直孔处快离子损失的速度空间分布,验证快离子损失速度空间分布的准确性。

**致谢** 感谢塞维利亚大学的Joaquin. Galdon-Quiroga对FIELDSIM程序模拟研究的支持,感谢EAST加热与诊断系统和运行团队对实验数据获取的支持。

**作者贡献声明** 王书松负责研究的提出及设计、数据的收集和整理、文章的起草和最终版本的修订;黄娟负责项目监督和管理,研究的提出与设计,文章的修订;常加峰负责研究的设计,实验数据的收集,项目的监督和管理;张新军负责文章的修订,项目的监督和管理;高伟负责文章的修订,数据的收集;付静、孙延旭、史唱、王曦辉、张子欣负责实验材料,实验过程的讨论,数据的收集。

### 参考文献

- 1 Rivero-Rodriguez J F, Garcia-Munoz M, Galdon-Quiroga J, *et al.* A fast model to resolve the velocity-space of fast-ion losses detected in ASDEX Upgrade and MAST Upgrade[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, **14**(9): C09015. DOI: [10.1088/1748-0221/14/09/c09015](https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/c09015).
- 2 Duong H H, Heidbrink W W, Strait E J, *et al.* Loss of energetic beam ions during TAE instabilities[J]. *Nuclear Fusion*, 1993, **33**(5): 749 - 765. DOI: [10.1088/0029-5515/33/5/i06](https://doi.org/10.1088/0029-5515/33/5/i06).
- 3 Zweben S J, Boivin R L, Diesso M, *et al.* Loss of alpha-like MeV fusion products from TFTR[J]. *Nuclear Fusion*, 1990, **30**(8): 1551 - 1574. DOI: [10.1088/0029-5515/30/8/013](https://doi.org/10.1088/0029-5515/30/8/013).
- 4 Van Zeeland M A, Ferraro N M, Grierson B A, *et al.* Fast ion transport during applied 3D magnetic perturbations on DIII-D[J]. *Nuclear Fusion*, 2015, **55**(7): 073028. DOI: [10.1088/0029-5515/55/7/073028](https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/7/073028).
- 5 Gonzalez-Martin J, Garcia-Munoz M, Sieglin B, *et al.* Self-adaptive diagnostic of radial fast-ion loss measurements on the ASDEX Upgrade tokamak (invited) [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, **92**(5): 053538. DOI: [10.1063/5.0043756](https://doi.org/10.1063/5.0043756).



- 6 Rivero-Rodriguez J F, Von Thun C P, Garcia-Muñoz M, *et al.* Upgrade and absolute calibration of the JET scintillator-based fast-ion loss detector[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, **92**(4): 043553. DOI: [10.1063/5.0043760](https://doi.org/10.1063/5.0043760).
- 7 Kim J, Kim J Y, Yoon S W, *et al.* Initial measurements of fast ion loss in KSTAR[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, **83**(10): 10D305. DOI: [10.1063/1.4733550](https://doi.org/10.1063/1.4733550).
- 8 Zhang Y P, Liu Y, Luo X B, *et al.* Development of the scintillator-based probe for fast-ion losses in the HL-2A tokamak[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, **85**(5): 053502. DOI: [10.1063/1.4872385](https://doi.org/10.1063/1.4872385).
- 9 Kim J Y, Rhee T, Kim J, *et al.* Prompt loss of beam ions in KSTAR plasmas[J]. *AIP Advances*, 2016, **6**(10): 105013. DOI: [10.1063/1.4966588](https://doi.org/10.1063/1.4966588).
- 10 García-Muñoz M, Fahrbach H U, Zohm H. Scintillator based detector for fast-ion losses induced by magnetohydrodynamic instabilities in the ASDEX upgrade tokamak[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, **80**(5): 053503. DOI: [10.1063/1.3121543](https://doi.org/10.1063/1.3121543).
- 11 Rodríguez-Ramos M, Garcia-Munoz M, Jimenez-Ramos M C, *et al.* First absolute measurements of fast-ion losses in the ASDEX Upgrade tokamak[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2017, **59**(10): 105009. DOI: [10.1088/1361-6587/aa7e5f](https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa7e5f).
- 12 Rivero-Rodriguez J F, Garcia-Munoz M, Martin R, *et al.* A rotary and reciprocating scintillator based fast-ion loss detector for the MAST-U tokamak[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, **89**(10): 10I112. DOI: [10.1063/1.5039311](https://doi.org/10.1063/1.5039311).
- 13 Jansen van Vuuren A, Lazerson S A, LeViness A, *et al.* Conceptual design of a scintillator-based fast-ion loss detector for the wendelstein 7-X stellarator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, **50**(11): 4114 - 4119. DOI: [10.1109/TPS.2022.3183890](https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3183890).
- 14 Chang J F, Isobe M, Ogawa K, *et al.* Scintillator-based fast ion loss measurements in the EAST[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(11): 11E728. DOI: [10.1063/1.4962245](https://doi.org/10.1063/1.4962245).
- 15 Jin Z, Chang J F, Huang J, *et al.* Extended scintillator-based fast-ion loss diagnostic in the EAST[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, **125**: 160 - 164. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2017.09.016](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.09.016).
- 16 Wu C R, Huang J, Chang J F, *et al.* Performance of fast-ion loss diagnostic on EAST[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, **89**(10): 10I144. DOI: [10.1063/1.5038782](https://doi.org/10.1063/1.5038782).
- 17 金钊, 常加峰, 黄娟, 等. 快电子对快离子损失诊断测量的影响[J]. *核技术*, 2017, **40**(11): 110605. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.110605](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.110605).
- JIN Zhao, CHANG Jiafeng, HUANG Juan, *et al.* The effect of fast electrons on fast ion loss detector[J]. *Nuclear Techniques*, 2017, **40**(11): 110605. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.110605](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.110605).
- 18 Galdon-Quiroga J, Garcia-Munoz M, Salewski M, *et al.* Velocity-space sensitivity and tomography of scintillator-based fast-ion loss detectors[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2018, **60**(10): 105005. DOI: [10.1088/1361-6587/aad76e](https://doi.org/10.1088/1361-6587/aad76e).
- 19 Chen Z, Zhao Y P, Chen G, *et al.* Design and implementation of power and phase feedback control system for ICRH on EAST[J]. *Nuclear Science Techniques*, 2018, **29**(2): 19. DOI: [10.1007/s41365-018-0362-8](https://doi.org/10.1007/s41365-018-0362-8).
- 20 姚方伟. EAST 离子回旋共振加热等离子体下的快离子行为研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- YAO Fangwei. Study on fast ion behavior in EAST ion cyclotron resonance heating plasma[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- 21 Sipilä S, Varje J, Johnson T, *et al.* ASCOT orbit-following simulations of ion cyclotron heating with synthetic fast ion loss diagnostic: a first application to ASDEX Upgrade [J]. *Nuclear Fusion*, 2021, **61**(8): 086026. DOI: [10.1088/1741-4326/ac0e71](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac0e71).