

离子回旋频率波加热下的 EAST 等离子体 锯齿行为研究

温晓东^{1,2} 徐立清¹ 胡立群¹ 刘海庆¹ 段艳敏¹ 储宇奇¹ 钟国强¹
张伟¹ 张新军¹ 麦晔玮^{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 合肥 230031)

2(中国科学技术大学研究生院科学岛分院 合肥 230026)

摘要 利用软 X 射线、中子注量检测诊断系统和偏振干涉仪 (Polarimeter-interferometer, POINT) 约束下的平衡反演算法 (Equilibrium Fitting Algorithm, EFIT), 对东方超环 (Experimental Superconducting Tokamak, EAST) 等离子体在离子回旋共振频率波 (Ion Cyclotron Resonance Frequency wave, ICRF) 在轴沉积加热下的锯齿周期, 锯齿幅度, $q = 1$ 面处等离子体压强梯度, $q = 1$ 面的半径的变化情形进行了研究。研究发现, 在轴沉积情况下, 加入 ICRF 可以对锯齿起致稳作用 (延长锯齿周期), 锯齿周期与 ICRF 功率呈正相关; 锯齿周期随着 ICRF 的加入或者 ICRF 功率的变化趋势, 与锯齿幅度和 $q = 1$ 面处等离子体压强梯度变化趋势大体上一致; 要改变 $q = 1$ 面半径, ICRF 的功率可能需要到 0.8 MW 以上; 在 ICRF 功率占比更高的加热条件下, 锯齿周期和 $q = 1$ 面半径随着 ICRF 功率变化更敏感; EAST 中 ICRF 产生的快离子和导致的 $q = 1$ 面半径的变化可能对锯齿行为有一定的影响。

关键词 东方超环, 离子回旋频率波加热, 锯齿模

中图分类号 TL61, TL65

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010502

Sawtooth behavior of EAST plasma under ICRF heating

WEN Xiaodong^{1,2} XU Liqing¹ HU Liqun¹ LIU Haiqing¹ DUAN Yanmin¹ CHU Yuqi¹
ZHONG Guoqiang¹ ZHANG Wei¹ ZHANG Xinjun¹ MAI Chaowei^{1,2}

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

2(Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract [Background] Sawtooth oscillations are macroscopic instabilities in plasma. To better control the sawtooth oscillation in an advanced experimental superconducting tokamak (EAST) device, it is necessary to develop sawtooth controlling methods that help improve the confined performance of plasma in the EAST device. [Purpose] This study aims to analyze sawtooth behavior under the on-axis heating by ion cyclotron resonance frequency (ICRF) wave in the EAST device. [Methods] First of all, the soft X-ray integrated signal intensity data was used to analyze the sawtooth period and amplitude. The radius of $q=1$ surface and the plasma pressure gradient at $q=1$ surface were

国家重点研发专项(No.2022YFE03010003)资助

第一作者: 温晓东, 男, 1993 年出生, 2017 年毕业于北京科技大学, 现为硕士研究生, 研究领域为 EAST 等离子体在 ICRF 加热下的锯齿不稳定性研究

通信作者: 徐立清, E-mail: lqxu@ipp.ac.cn

收稿日期: 2022-10-24, 修回日期: 2022-12-01

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFE03010003)

First author: WEN Xiaodong, male, born in 1993, graduated from University of Science and Technology of Beijing in 2017, master student, focusing on research of sawtooth instability under ICRF heating in EAST

Corresponding author: XU Liqing, E-mail: lqxu@ipp.ac.cn

Received date: 2022-10-24, revised date: 2022-12-01

calculated using a soft X-ray intensity profile. Then the neutron yield flux was obtained from the neutron yield flux diagnostic data. Finally, the equilibrium reconstruction results of the equilibrium fitting algorithm (EFIT) were combined with polarimeter-interferometer (POINT) diagnostic data to investigate the relationship between the variation of ICRF and plasma current density. **[Results]** Experimental results show that the sawtooth period is positively correlated with the ICRF power, and the variation in sawtooth period is roughly same as that in sawtooth amplitude and plasma pressure gradient at $q=1$ surface. The ICRF power needs to exceed 0.8 MW to change the radius of $q=1$ surface. The sawtooth period and $q=1$ surface with ICRF power change are more sensitive under solely ICRF heating than under ICRF+lower hybrid wave (LHW) +electron cyclotron resonance heating (ECRH). **[Conclusions]** Sawtooth behavior of EAST plasma is affected by the fast ions produced by ICRF and the radius change of $q=1$ surface.

Key words EAST tokamak, Ion cyclotron resonance frequency (ICRF), Sawtooth oscillation

锯齿振荡是一种在托卡马克等离子体芯部出现的宏观不稳定性,可通过等离子体中的电子温度、电子密度和其他等离子体参数观测到,1974年首先在ST托卡马克(Spherical Tokamak)中的软X射线诊断信号中发现^[1]。锯齿模一方面有利于排除芯部的杂质,这种能力在未来的核聚变装置如聚变堆中可以用于排除氦灰;另一方面,长周期锯齿引起的磁岛种子有可能激发新经典撕裂模(Neoclassical Tearing Mode, NTM)^[2], NTM不稳定性会限制等离子体的比压 β 值,不利于托卡马克等离子体高性能约束的实现,所以锯齿控制是实现托卡马克等离子体高性能约束的重要课题。目前,国际上托卡马克装置中用于控制锯齿行为的方法主要使用电子回旋电流驱动(Electron Cyclotron Current Drive, ECCD)^[3-4]、中子束注入(Neutron Beam Injector, NBI)^[5-6]、离子回旋共振频率波加热(Ion Cyclotron Resonance Frequency, ICRF)^[7-9]。然而,在未来大型托卡马克聚变装置中,NBI主要起到延长锯齿周期的作用,对减少锯齿周期的作用一般^[10]。所以,未来的聚变堆中控制锯齿行为主要使用ECCD和ICRF两种手段。ICRF作为一种辅助ECCD的控制锯齿的手段能直接改变扰动势能^[8-9],利用ICRF的快离子机制可以更好地抵消掉未来氘-氦聚变反应中产生的 α 粒子对锯齿的影响,同时减轻使用ECCD控制锯齿的耗能负担^[11]。在EAST托卡马克装置上,使用ECCD^[12]、低杂波(Low Hybrid Wave, LHW)^[13]、NBI^[14]控制锯齿行为的实验以及相关的分析已经比较成熟,但是关于ICRF控制锯齿行为方面的实验分析仍然相对缺乏。因此,在EAST上展开ICRF控制锯齿的实验研究十分必要,这可以为未来在国内新一代的聚变装置中实现锯齿控制积累更先进技术经验。

1 研究方法

1.1 实验设置

本文使用软X射线(Soft X-ray, SXR)诊断^[15]作为研究工具,通过等离子体软X射线的强度线积分信号和剖面分布曲线来研究在ICRF加热下锯齿周期等参数的变化。使用中子注量检测诊断系统^[16]观察ICRF加热下中子注量率的变化。使用偏振干涉仪(Polarimeter-interferometer, POINT)^[17]结合平衡反演算法(Equilibrium Fitting Algorithm, EFIT)计算出ICRF加热下的等离子体中电流密度分布^[18]的变化。本文中分析的所有数据均是在ICRF在轴沉积加热下,在等离子体电流平稳段获取的数据。

1.2 统计原理

锯齿周期和锯齿幅度的特征如图1所示,锯齿崩塌前时刻 t_1 处的SXR强度减去崩塌后时刻 t_2 处的SXR强度之差为锯齿幅度值,相邻两个锯齿崩塌后时刻 t_2 和 t_3 的间隔为锯齿周期。软X射线强度及其分布是由等离子体中的温度、密度和杂质决定的,所以,可以使用SXR的强度分布近似表示等离子体压强分布^[19],在锯齿崩塌前一时刻,等离子体芯部的压强较为峰化,在锯齿崩塌后一时刻,等离子体芯部的能量往芯部外输运,此时芯部的等离子体压强变小, $q=1$ 面外的压强值升高, $q=1$ 面处的压强保持不变,所以 $q=1$ 面半径的确定方法如图2所示,在锯齿崩塌前后各某一时刻得到SXR的剖面曲线上,两者交点的平均值即锯齿反转面半径(即 $q=1$ 面的半径)^[20]。在得到 $q=1$ 面的半径后,SXR强度剖面曲线在该半径位置处的斜率即为 $q=1$ 面处的等离子体压强梯度。

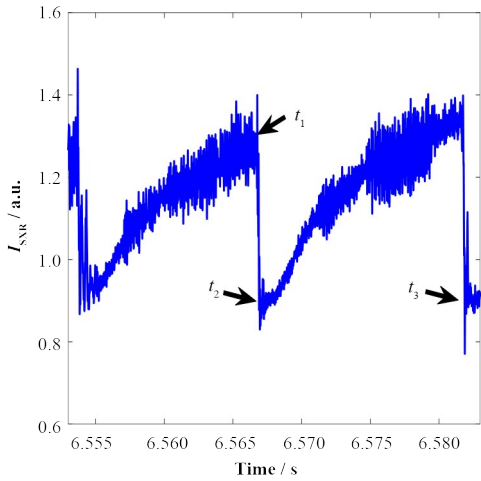


图1 EAST等离子体芯部锯齿振荡的软X射线(SXR)强度
 I_{SXR}
 t_1 和 t_2 分别表示锯齿崩塌前后的时间点, t_3 表示下一个锯齿崩塌后的时间点

Fig.1 Core soft X-ray (SXR) intensity I_{SXR} of plasma with sawtooth oscillation in the EAST device. t_1 and t_2 are the time point before and after sawtooth crash, respectively, and t_3 is the time point just after the next sawtooth crash

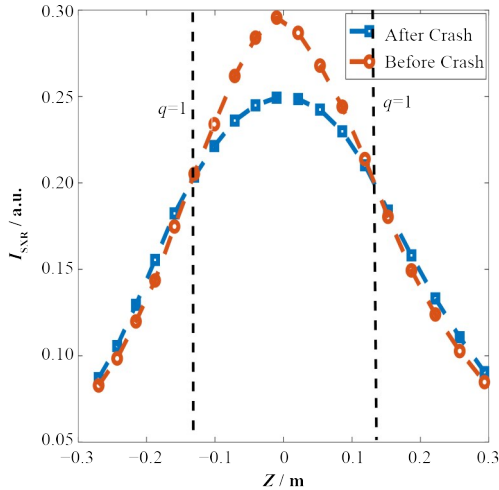


图2 锯齿崩塌前后SXR剖面分布曲线(横坐标是EAST横截面上的Z方向)

Fig.2 The SXR profile curve of the moment just before and after the sawtooth crash (the X-coordinate is the Z-direction on the cross section of EAST)

2 实验结果和讨论

2.1 ICRF 加入对锯齿周期等参数的影响

2.1.1 锯齿周期

在#111906炮中,可看到ICRF对锯齿周期的影响。由图3(a~c)可知,该典型炮的实验参数为等离子体电流 I_p 为400 kA,电子密度 N_e 为 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,电子温度 T_e 为2.5 keV。图中虚线表示ICRF加入的时刻。图3(d)中,总功率为0.8 MW的ICRF(图中的ICRF1和ICRF2分别指的是从EAST的I窗口和N窗口加入的ICRF的功率)在2.6 s左右加入,从图3

(g)可以清楚地看到,锯齿形态随着ICRF的加入,在2.6 s后发生了明显的变化。图4(a)中,ICRF加热阶段,锯齿周期从之前稳定的15 ms左右延长到接近25 ms。由此可见,ICRF注入对锯齿起到了致稳的作用,与文献[21]中的锯齿致稳现象类似。

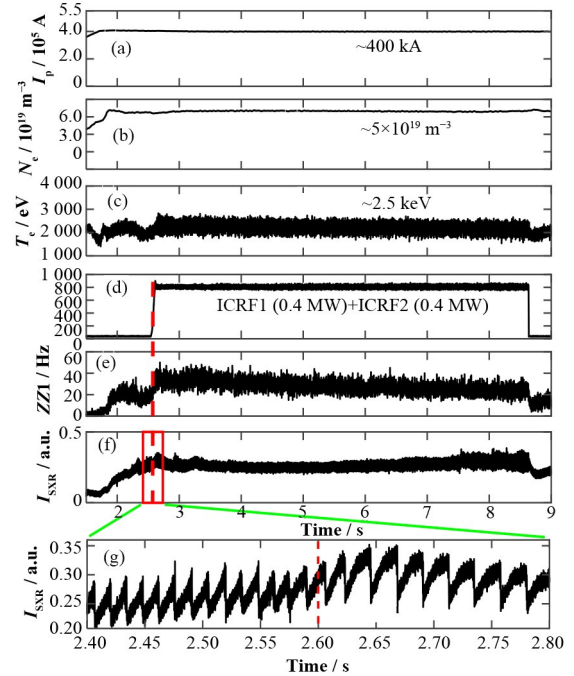


图3 EAST#111906炮中软X射线强度以及中子注量率等参数随着ICRF加热的变化

(a) 等离子体电流时序变化曲线,(b) 电子密度时序变化曲线,(c) 电子温度时序变化曲线,(d) ICRF功率时序变化曲线,(e) 中子注量率时序变化曲线,(f) 含有锯齿振荡的SXR强度信号时序变化曲线,(g) 是(f)中小框的含有锯齿振荡的SXR强度信号放大图

Fig.3 Changing curve of the soft X-ray intensity and neutron yield flux and other parameters of the EAST device #111906 shot under ICRF heating: time sequences curve of (a) plasma current, (b) electron density, (c) electron temperature, (d) the ICRF power, (e) neutron yield flux, and (f) soft X-ray intensity and (g) zoomed figure of the signal in the rectangular box in (f)

2.1.2 锯齿幅度和 $q = 1$ 面处等离子体压强梯度

由图4(b,c)可见(图中虚线表示加ICRF的时刻),加入ICRF后,锯齿幅度和 $q = 1$ 面处等离子体压强梯度在整体上都呈现出增加的趋势(加入ICRF之前锯齿幅度整体一半时刻都在0.15以下,加入ICRF后几乎所有时刻都在0.15之上;加入ICRF之前,等离子体压强梯度值基本在1以下,加入ICRF后都在1以上),两者的变化与锯齿周期整体上变化趋势一致,都随着ICRF加入而增大。

2.1.3 $q = 1$ 面半径、等离子体电流密度以及中子注量率

图4(d)中加入ICRF后, $q = 1$ 面的半径(在横截面Z方向上的半径)整体都在约0.12 m附近,即加入0.8 MW的ICRF, $q = 1$ 面的半径并没有怎么改变,

考虑到安全因子剖面为:

$$q(r) = \frac{2\pi r^2 B_{z0}}{\mu_0 R I(r)} \quad (1)$$

和 $q = 1$ 面处的磁剪切为:

$$s_1 = r_1 dq/dr \quad (2)$$

式中: $I(r)$ 为等离子体电流分布; r_1 正比于本文中 $q = 1$ 面的半径。所以, $q = 1$ 面半径的改变一般都是由等离子体中的电流密度变化所引起, 同时相应地 s_1 会改变。为了进一步验证我们的 SXR 数据分析结果, 本文在 ICRF 加入时刻前后各取一个时刻点, 通过 POINT 结合 EFIT 平衡反演, 得到了 ICRF 加热前后等离子体中电流密度的变化剖面曲线。如图 5 所示, 加入 ICRF 后, 等离子体芯部中的电流密度变化程度很小(可能是 ICRF 功率不太大原因), 与 $q = 1$ 面半径基本不变的实验结果相对应。

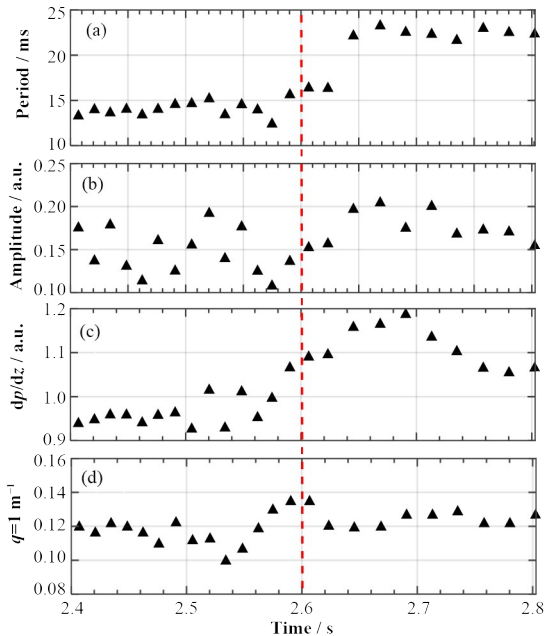


图4 EAST#111906 炮中施加 ICRF 前后锯齿周期和锯齿幅度等参数随时间的变化 (a) 锯齿周期变化曲线, (b) 锯齿幅度变化曲线, (c) $q = 1$ 面处等离子体压强梯度变化曲线, (d) $q = 1$ 面半径变化曲线

Fig.4 Sawtooth period, amplitude, and other parameter changing with time before and after ICRF heating in the EAST device # 111906 shot: variation curve of (a) sawtooth period, (b) sawtooth amplitude, (c) plasma pressure gradient at $q=1$ surface, (d) $q=1$ surface radius

从图 3(e) 可以观察到中子注量率, 随 ICRF 的变化关系与锯齿周期、锯齿幅度和 $q = 1$ 面处的等离子体压强变化一致, 都随着 ICRF 的加入而增加。目前, EAST 上聚变中子份额主要由热核反应、束-靶反应和束-束反应组成, 其中束-靶反应占绝大部分份额(80%~90%), 因此, 聚变中子行为可以用来表征等离子体中的快离子的特性^[22-23]。即实验中快离子

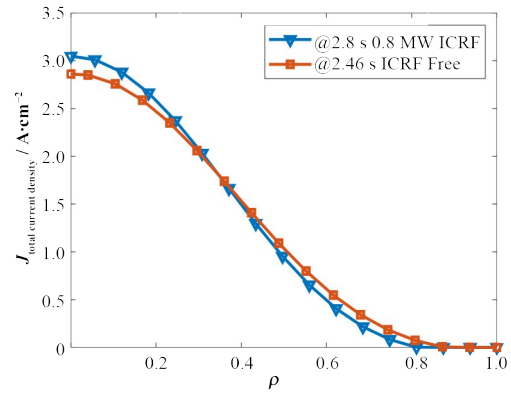


图5 EAST#111906 炮中, ICRF 加入前后时刻等离子体中总电流密度剖面, 方形标记表示没有 ICRF 加入时刻的总电流密度剖面, 倒三角标记表示加入了 0.8 MW ICRF 后的总电流密度剖面

Fig.5 Plasma current density profile of the moments before and after ICRF heating in the EAST device #111906 shot. Curve marked by squares represents the total current density before injecting ICRF, while the one marked by triangles stands for the total current density after injecting 0.8 MW ICRF

随 ICRF 的加入而增加。

2.1.4 实验现象分析

由 §2.1.1 可知, 加入了 0.8 MW 的 ICRF, 可以导致致稳锯齿的作用, 但是从 §2.1.3 中的结果可见, 可能是 ICRF 功率太小, 对 $q = 1$ 面的半径大小几乎没什么影响。而 ICRF 控制锯齿周期的机制主要有快离子机制^[24-28], 或者是根据 Pocerlli 提出的锯齿崩塌模型^[29], 通过 ICCD^[30] 等方式来改变 s_1 , 进而影响锯齿周期。从 §2.1.3 可知, ICRF 加入后, 快离子随之增加, 所以, 实验观察到的 ICRF 的加入致稳锯齿的原因很可能主要来源于 ICRF 加入产生的快离子。

2.2 ICRF 功率对锯齿周期等参数的影响

由 §2.1 分析可知, 加入 ICRF 会使锯齿周期、锯齿幅度、 $q = 1$ 面处的等离子体压强梯度以及 $q = 1$ 面半径、电流密度、快离子在数值上有不同程度的变化。下面我们将进一步分析, 在 ICRF 加热阶段, 改变 ICRF 功率对锯齿周期等参数的影响。

2.2.1 锯齿周期

在 #109016 典型炮中可以看到 ICRF 功率变化对锯齿周期的影响。由图 6(a~c) 可知, 该炮的实验参数为等离子体电流 I_p 为 400 kA, 电子密度 N_e 为 $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 电子温度 T_e 为 3.5 keV。图中虚线表示 N 窗口停止加 ICRF 的时刻。如图 6(d) 所示, 在 5.2~6.58 s 期间, 在 EAST 的 N 窗口和 I 窗口同时注入功率为 0.8 MW 的 ICRF, 总功率为 1.6 MW, 在 6.58 s 左右, N 窗口 ICRF 停止注入, 只剩下 I 窗口功率 0.8 MW 的 ICRF。从图 6(g) 中可见, 在 6.58 s 前后, 锯齿的形态随着 ICRF 功率的降低发生了相应的变

化。由图 7(a) 可见(图中虚线表示 N 窗口停止加 ICRF 的时刻), ICRF 功率从 1.6 MW 下降到 0.8 MW 的过程中, 锯齿周期从 20 ms 下降到 10 ms, 与 ICRF 功率变化成正相关。

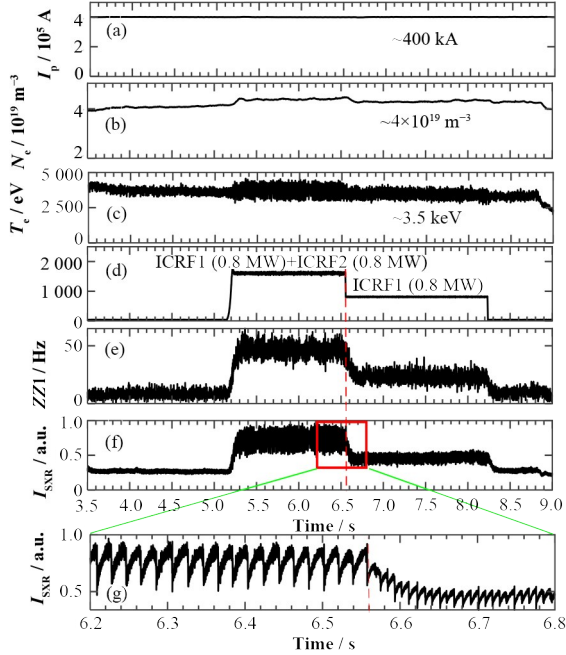


图 6 EAST#109016 炮中软 X 射线强度以及中子注量率等参数随着 ICRF 加热的变化

(a) 等离子体电流时序变化曲线, (b) 电子密度时序变化曲线, (c) 电子温度时序变化曲线, (d) ICRF 功率时序变化曲线, (e) 中子注量率时序变化曲线, (f) 含有锯齿振荡的 SXR 强度信号时序变化曲线, (g) 是 (f) 中小框的含有锯齿振荡的 SXR 强度信号放大图

Fig.6 Changing curve of soft X-ray intensity, neutron yield flux, and other parameters of the EAST device #109016 shot with ICRF heating: time sequences curve of (a) plasma current, (b) electron density, (c) electron temperature, (d) power of ICRF, (e) neutron yield flux, and (f) soft X-ray intensity and (g) zoomed figure of the signal in the rectangular box in (f)

2.2.2 锯齿幅度和 $q = 1$ 面处的等离子体压强梯度

从图 7(b, c) 可见, ICRF 功率从 1.6 MW 下降到 0.8 MW 的过程中, 锯齿幅度从约 0.8 下降到 0.2, $q = 1$ 面处等离子体压强梯度从约 3.5 下降到 2, 两者随着 ICRF 功率变化的趋势和锯齿周期一样, 都与 ICRF 功率成正相关关系。

2.2.3 $q = 1$ 面半径及中子注量率(快离子)

在图 7(d) 中, $q = 1$ 面半径随着 ICRF 功率的下降, 从约 0.14 m 减小到 0.12 m, 很可能是因为在开始 ICRF 功率达到了 1.6 MW, 从而使 $q = 1$ 面往外移到了约 0.14 m 这个位置, 等 ICRF 功率降到了 0.8 MW, $q = 1$ 面的半径又回到了像 §2.1 一样的 0.12 m 的位置, 整体变化趋势与锯齿周期一致。

快离子的数目可用中子注量率表征, 从图 6(e)

可知, 快离子数目的变化与 ICRF 功率变化成正相关, 与锯齿周期变化趋势一致。

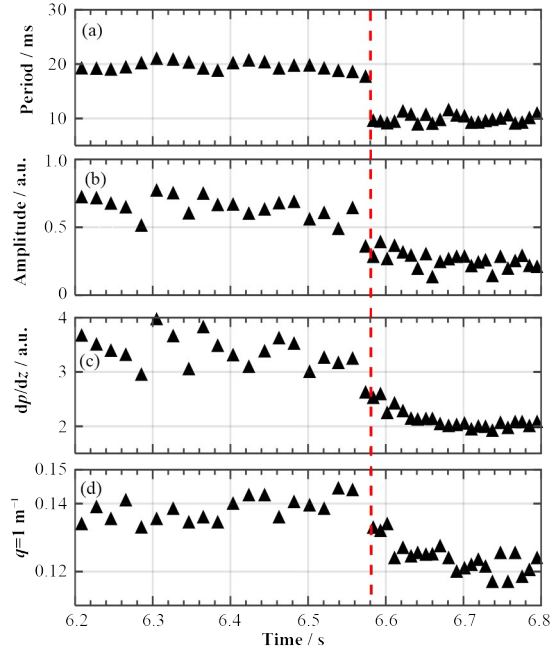


图 7 EAST#109016 炮中改变 ICRF 功率, 锯齿周期和锯齿幅度等参数随时间的变化

(a) 锯齿周期变化曲线, (b) 锯齿幅度变化曲线, (c) $q = 1$ 面处等离子体压强梯度变化曲线, (d) $q = 1$ 面半径变化曲线

Fig.7 Sawtooth period, amplitude, and other parameters changing with time under different ICRF heating power in the EAST device #109016 shot: variation curve of (a) sawtooth period, (b) sawtooth amplitude, (c) plasma pressure gradient at $q = 1$ surface, and (d) $q = 1$ surface radius

2.2.4 实验现象分析

当 ICRF 功率为 1.6 MW 时, $q = 1$ 面会往外移, 结合 §2.1 中加入 0.8 MW 的 ICRF 后, $q = 1$ 面几乎不变的现象可推测, 要想使 $q = 1$ 面往外移动, ICRF 的功率可能至少要大于 0.8 MW。随着 ICRF 功率的变化, 锯齿周期与快离子数目以及 $q = 1$ 面的半径大小变化趋势一致, 根据 §2.1.4 的分析, 实验观察到的 ICRF 的功率变化影响锯齿周期的原因很可能主要来源于 ICRF 功率变化导致的快离子数目的变化和 $q = 1$ 面半径的改变。

2.3 不同背景加热条件下 ICRF 功率对锯齿周期等参数的影响

从 §2.2 中知道同一炮中, ICRF 加热阶段, 锯齿周期等参数与 ICRF 功率成正相关。为了验证 ICRF 功率对锯齿行为的这种影响的多炮可重复性, 接下来, 在两种不同背景加热条件下观察 ICRF 功率(其他实验条件相同, 只改变 ICRF 功率)对锯齿周期以及其他参数的影响。图 8 是锯齿周期、锯齿幅度、

$q = 1$ 处等离子体压强梯度、 $q = 1$ 面半径随 ICRF 功率变化的时间序列图,不同标记代表不同的加热条件,图中的虚线为各自的趋势线。方形标记表示只有 ICRF 加热,实验条件为: $I_p = 500 \text{ kA}$, $N_e = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 纵向磁场强度 $B_t = 2.8 \text{ T}$, 该条件下,我们

做了 5 炮实验;圆形标记表示同时有 ICRF、LHW 和电子回旋波(Electron Cyclotron Resonance Heating, ECRH)加热,实验条件为:LHW 均为 2 MW , ECRH 均为 1 MW , $I_p = 400 \text{ kA}$, $N_e = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 纵向磁场强度 $B_t = 2.8 \text{ T}$, 该条件下,我们做了 8 炮实验。

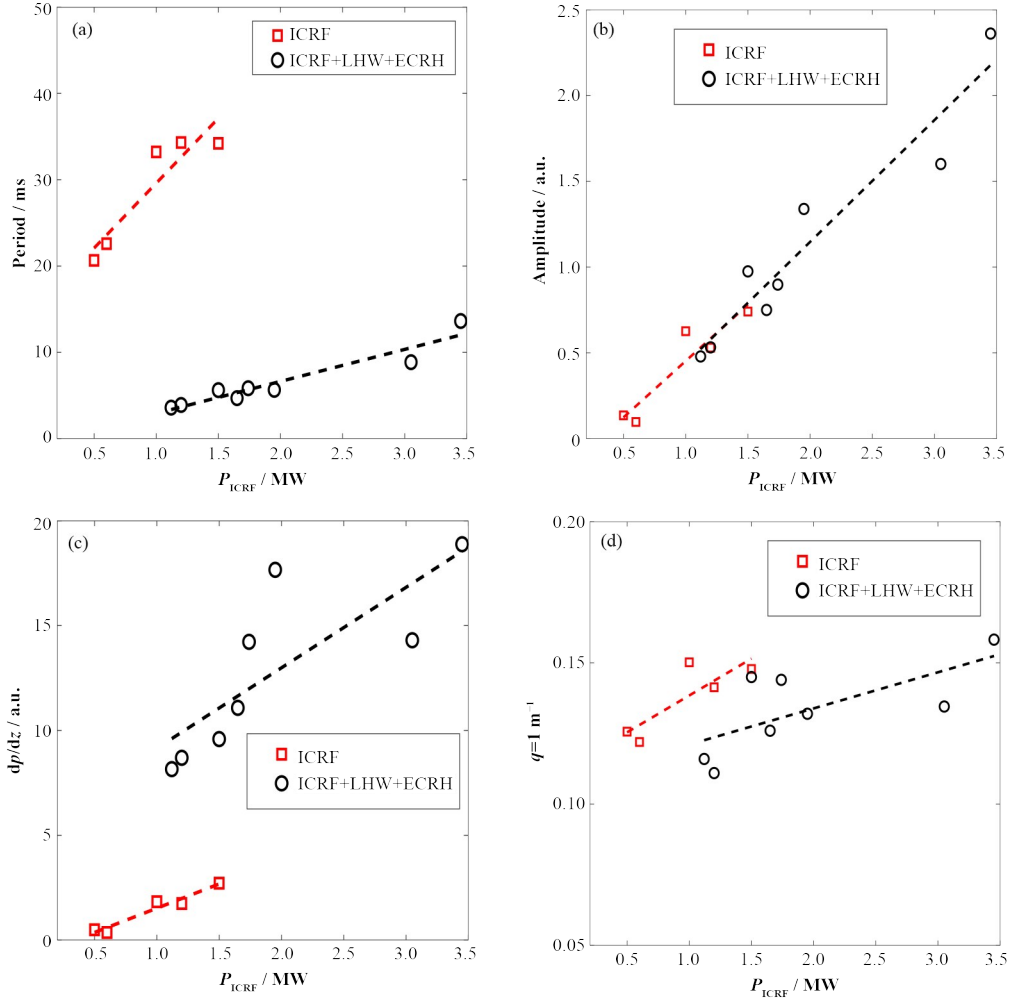


图8 EAST不同背景加热条件下,锯齿周期(a)、锯齿幅度(b)、 $q = 1$ 面处等离子体压强梯度(c)和 $q = 1$ 面半径(d)随ICRF功率变化曲线

Fig.8 Under different heating conditions in the EAST device, the curve of (a) sawtooth period, (b) sawtooth amplitude, (c) plasma pressure gradient at $q=1$ surface, (d) $q=1$ surface radius changing with ICRF power

2.3.1 锯齿周期

由图8(a)可见,无论是在只有ICRF加热下,还是在ICRF+LHW+ECRH加热下,锯齿周期均随着ICRF功率的增加而增加,与ICRF功率成正相关,与#109016单炮中ICRF功率变化引起的结果类似。其中对比两种不同背景加热条件下锯齿周期的变化趋势线斜率,可见只有ICRF加热的情况下,锯齿周期对ICRF功率变化更加敏感,也即ICRF功率占比更高的加热条件下,改变ICRF功率,锯齿周期变化程度更大。

2.3.2 锯齿幅度和 $q = 1$ 面处的等离子体压强梯度

由图8(b)可见,无论是在ICRF加热下,还是在ICRF+LHW+ECRH加热下,锯齿幅度均随着ICRF功率的增加而增加,与ICRF功率成正相关,整体上与锯齿周期的变化趋势一致,与#109016单炮中ICRF功率变化引起的结果类似。对比两种加热条件下的锯齿幅度随着ICRF功率变化趋势线,可见ICRF功率占比不影响锯齿幅度对ICRF功率变化的敏感度。由图8(c)可见,无论是在ICRF加热下,还是在ICRF+LHW+ECRH加热下, $q = 1$ 面处的等离

子体压强梯度均随着 ICRF 功率的增加而增加,与 ICRF 功率成正相关,整体上与锯齿周期的变化趋势一致,与 #109016 单炮中 ICRF 功率变化引起的结果类似。对比两种加热条件下等离子体压强梯度随着 ICRF 功率变化,可见在 ICRF 功率占比更低的加热条件下,等离子体压强梯度反而更高。

2.3.3 $q = 1$ 面半径

由图 8(d) 可见,无论是在 ICRF 加热下,还是在 ICRF+LHW+ECRH 加热下,随着 ICRF 功率增加, $q = 1$ 面半径都会有往外移动的趋势,这种结果与 #109016 单炮中 ICRF 功率变化与 $q = 1$ 面半径变化关系类似。其中对比两种不同背景加热条件下, $q = 1$ 面半径变化趋势线斜率,可见在 ICRF 功率占比更高的加热条件下, $q = 1$ 面半径对 ICRF 功率变化更加敏感。

2.3.4 实验现象分析

由 §2.3.1 的分析以及 §2.2 的实验结果可知,锯齿周期与 ICRF 功率成正相关的这种关系,有多炮可重复性;图 8(a) 中呈现出的 ICRF 功率占比更高的加热条件下,锯齿周期对 ICRF 功率更敏感的现象可能是因为存在 LHW 和 ECRH 时,等离子体电流等参数更容易峰化(这从图 8(c) 也可以反映出来,明显看到图 8(a) 与图 8(c) 大小关系反过来),从而 1/1 模更容易产生,锯齿不断地崩塌,再爬升,再崩塌,所以在 ICRF+LHW+ECRH 加热方式下,即使 ICRF 功率达到了近 3.5 MW,锯齿周期还是偏小。

2.4 讨论

由 §2.1~§2.3 的实验现象及分析可知,与锯齿周期变化趋势一样,等离子体的压强梯度会随 ICRF 的注入或者 ICRF 功率的增加而变大,这种现象同样出现在锯齿幅度上。锯齿幅度可以大致反映出锯齿崩塌时从等离子体芯部跑到 $q = 1$ 面外的热流通量。这意味着,ICRF 在轴沉积加热下,ICRF 的注入或者增加功率会使锯齿周期长,大的锯齿周期对应着 $q = 1$ 面更大的等离子体压强梯度,同时在锯齿崩塌时,等离子体芯部会损失更多的能量。而且我们发现 #111906 和 #109016 两炮中,虽然实验条件不同,但是 ICRF 功率同样是变化 0.8 MW 的时候,锯齿周期变化幅度都是 10 ms。

本文只考虑 EAST 在 ICRF 在轴沉积加热下,ICRF 从无到有和 ICRF 功率变化以及不同背景加热条件下 ICRF 功率变化对锯齿行为的影响,但是 ICRF 影响锯齿行为的因素还有很多。例如 ICRF 在轴沉积加热下,Eriksson 等^[27]发现,在不对称的环向波谱加热下,ICRF 发射天线电流相位不同会引起捕

获离子香蕉轨道漂移的方向不同,快离子压强径向分布也不同,从对锯齿周期产生不同的影响;除了捕获离子,在特殊速度空间分布函数形式下,通行离子也起到致稳锯齿的作用,甚至占主导作用^[31];还有离轴沉积加热下,速度空间不对称的快离子^[32]对锯齿行为的影响。再者,本文中 ICRF 变化产生的快离子对锯齿行为影响机制是否与快离子速度空间分布有关,ICRF 功率引起的 $q = 1$ 面半径的变化是来源于局部加热引起的等离子体电阻率($\eta \sim T^{-3/2}$)变化,还是来源于 ICCD^[30],或是其他因素,这些都有待在 EAST 上进行更深一步的研究。

3 结语

本文主要统计分析 EAST 上 ICRF 在轴沉积加热条件下,典型炮 #111906 中 ICRF 的加入和 #109016 中 ICRF 功率变化,以及不同背景加热条件下 ICRF 功率变化对锯齿的周期、锯齿幅度、 $q = 1$ 面处等离子体压强梯度和 $q = 1$ 面半径的影响。得到的一系列实验结果表明:1) 在轴沉积加热下,ICRF 的加入可以增大锯齿周期,锯齿的周期与 ICRF 功率成正相关的关系,并且这种关系在不同背景加热条件下有多炮可重复性,说明未来在 EAST 中,ICRF 作为一种控制锯齿的手段是可行的;2) 锯齿幅度和 $q = 1$ 面处等离子体压强梯度两者与 ICRF 的变化趋势与锯齿周期的一致,说明锯齿周期越大,在整体来看对应着 $q = 1$ 面处更大的等离子体压强梯度以及崩塌时会往等离子体芯部外面输运更多能量;3) 改变 $q = 1$ 面半径,ICRF 的功率可能至少需要到 0.8 MW 以上;4) 在 ICRF 功率占比更高的加热条件下,锯齿周期和 $q = 1$ 面随着 ICRF 功率变化更敏感,所以在 EAST 上想要进一步研究控制锯齿周期更多细节,采用只有 ICRF 的加热方案比 ICRF+LHW+ECRH 加热方案要好;5) 通过观察 ICRF 的变化引起的快离子数目, $q = 1$ 面半径的变化以及锯齿周期的变化关系,可以猜测在 EAST 中,ICRF 在轴沉积加热下,ICRF 加入后致稳锯齿可能主要来源于 ICRF 产生的快离子,而 ICRF 功率变化引起的锯齿周期的变化可能与 ICRF 导致的快离子和 $q = 1$ 面半径的变化有关系。

作者贡献声明 温晓东:完成实验、数据处理、分析和写作;徐立清、胡立群:指导实验、数据处理、分析和写作;徐立清、段艳敏:提供和指导实验中用到的软 X 射线诊断数据以及相关知识;刘海庆、储宇奇:提供 POINT 反演结果;钟国强:提供中子注量诊断数据;张伟、张新军:提供和指导 ICRF 数据以及相关

知识;麦晔玮:帮助和指导数据处理方面的方法。

参考文献

- 1 von Goeler S, Stodiek W, Sauthoff N. Studies of internal disruptions and $m=1$ oscillations in tokamak discharges with soft — X-ray techniques[J]. *Physical Review Letters*, 1974, **33**(20): 1201 – 1203. DOI: [10.1103/physrevlett.33.1201](https://doi.org/10.1103/physrevlett.33.1201).
- 2 Canal G P, Duval B P, Felici F, *et al.* Fast Seeding of neoclassical tearing modes by Sawtooth crashes in TCV [C]. EPS/ICPP 2012, 39th EPS Conference on Plasma Physics 16th International Congress on Plasma Physics. 2012.
- 3 Westerhof E, Hoekzema J A, Hogeweyj G M D, *et al.* Electron cyclotron resonance heating on TEXTOR[J]. *Fusion Science and Technology*, 2005, **47**(2): 108 – 118. DOI: [10.13182/fst05-a692](https://doi.org/10.13182/fst05-a692).
- 4 Ikeda Y, Ide S, Suzuki T, *et al.* ECRF experiments for local heating and current drive by fundamental O-mode launch from the low-field side on JT-60U[J]. *Nuclear Fusion*, 2002, **42**(4): 375 – 382. DOI: [10.1088/0029-5515/42/4/301](https://doi.org/10.1088/0029-5515/42/4/301).
- 5 Chapman I T, Hender T C, Saarelma S, *et al.* The effect of toroidal plasma rotation on sawteeth in MAST[J]. *Nuclear Fusion*, 2006, **46**(12): 1009 – 1016. DOI: [10.1088/0029-5515/46/12/004](https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/12/004).
- 6 Chapman I T, Pinches S D, Koslowski H R, *et al.* Sawtooth stability in neutral beam heated plasmas in TEXTOR[J]. *Nuclear Fusion*, 2008, **48**(3): 035004. DOI: [10.1088/0029-5515/48/3/035004](https://doi.org/10.1088/0029-5515/48/3/035004).
- 7 Eriksson L G, Mueck A, Sauter O, *et al.* Destabilization of fast-ion-induced long sawteeth by localized current drive in the JET tokamak[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **92**(23): 235004. DOI: [10.1103/PhysRevLett.92.235004](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.235004).
- 8 McClements K G, Dendy R O, Hastie R J, *et al.* Modeling of sawtooth destabilization during radio-frequency heating experiments in tokamak plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 1996, **3**(8): 2994 – 3003. DOI: [10.1063/1.871629](https://doi.org/10.1063/1.871629).
- 9 Graves J P, Chapman I T, Coda S, *et al.* Experimental verification of sawtooth control by energetic particles in ion cyclotron resonance heated JET tokamak plasmas[J]. *Nuclear Fusion*, 2010, **50**(5): 052002. DOI: [10.1088/0029-5515/50/5/052002](https://doi.org/10.1088/0029-5515/50/5/052002).
- 10 Chapman I T, de Bock M F, Pinches S D, *et al.* The effect of off-axis neutral beam injection on sawtooth stability in ASDEX Upgrade and Mega-Ampere Spherical Tokamak [J]. *Physics of Plasmas*, 2009, **16**(7): 072506. DOI: [10.1063/1.3187905](https://doi.org/10.1063/1.3187905).
- 11 Chapman I T. Controlling sawtooth oscillations in tokamak plasmas[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2011, **53**: 013001. DOI: [0741-3335/53/1/013001](https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/1/013001).
- 12 Yuan Y, Hu L Q, Xu L Q, *et al.* Control of sawtooth via ECRH on EAST tokamak[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, **23**(6): 062503. DOI: [10.1063/1.4953605](https://doi.org/10.1063/1.4953605).
- 13 Liu Z X, Gao X, Jie Y X, *et al.* Sawtooth control experiments on HT-7 and EAST tokamak[J]. *Plasma Science and Technology*, 2012, **14**(4): 278 – 284. DOI: [10.1088/1009-0630/14/4/03](https://doi.org/10.1088/1009-0630/14/4/03).
- 14 Chao Y, Xu L Q, Hu L Q, *et al.* Sawtooth activities in EAST neutral beam injection plasma[J]. *AIP Advances*, 2019, **9**(1): 015226. DOI: [10.1063/1.5051406](https://doi.org/10.1063/1.5051406).
- 15 Chen K Y, Xu L Q, Hu L Q, *et al.* 2-D soft X-ray arrays in the EAST[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(6): 063504. DOI: [10.1063/1.4953837](https://doi.org/10.1063/1.4953837).
- 16 Zhong G, Hu L, Li X, *et al.* Measurement of neutron flux at the initial phase of discharge in EAST[J]. *Plasma Science and Technology*, 2011, **13**(2): 162. DOI: [10.1088/1009-0630/13/2/07](https://doi.org/10.1088/1009-0630/13/2/07).
- 17 Liu H Q, Qian J P, Jie Y X, *et al.* Initial measurements of plasma current and electron density profiles using a polarimeter/interferometer (POINT) for long pulse operation in EAST (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(11): 11D903. DOI: [10.1063/1.4963378](https://doi.org/10.1063/1.4963378).
- 18 Qian J P, Lao L L, Liu H Q, *et al.* EAST equilibrium current profile reconstruction using polarimeter-interferometer internal measurement constraints[J]. *Nuclear Fusion*, 2017, **57**(3): 036008. DOI: [10.1088/1741-4326/aa4e58](https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa4e58).
- 19 Edwards A W, Campbell D J, Engelhardt W W, *et al.* Rapid collapse of a plasma sawtooth oscillation in the JET tokamak[J]. *Physical Review Letters*, 1986, **57**(2): 210 – 213. DOI: [10.1103/PhysRevLett.57.210](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.210).
- 20 Zohm H. Current driven ideal MHD modes in a tokamak [M]//*Magnetohydrodynamic Stability of Tokamaks*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015: 55 – 68. DOI: [10.1002/9783527677375.ch4](https://doi.org/10.1002/9783527677375.ch4).
- 21 Coppi B, Detragiache P, Migliuolo S, *et al.* Quiescent window for global plasma modes[J]. *Physical Review Letters*, 1989, **63**(25): 2733 – 2736. DOI: [10.1103/](https://doi.org/10.1103/)

- PhysRevLett.63.2733.
- 22 Eriksson J, Hellesen C, Binda F, *et al.* Measuring fast ions in fusion plasmas with neutron diagnostics at JET[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2018, **61**(1): 014027. DOI: [10.1088/1361-6587/aad8a6/meta](https://doi.org/10.1088/1361-6587/aad8a6/meta).
 - 23 Isobe M, Ogawa K, Nishitani T, *et al.* Fusion neutron production with deuterium neutral beam injection and enhancement of energetic-particle physics study in the large helical device[J]. Nuclear Fusion, 2018, **58**(8): 082004. DOI: [10.1088/1741-4326/aabcf4/meta](https://doi.org/10.1088/1741-4326/aabcf4/meta).
 - 24 White R B, Rutherford P H, Colestock P, *et al.* Sawtooth stabilization by energetic trapped particles[J]. Physical Review Letters, 1988, **60**(20): 2038 - 2041. DOI: [10.1103/PhysRevLett.60.2038](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.2038).
 - 25 Campbell D J, Start D F, Wesson J A, *et al.* Stabilization of sawteeth with additional heating in the JET tokamak [J]. Physical Review Letters, 1988, **60**(21): 2148 - 2151. DOI: [10.1103/PhysRevLett.60.2148](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.2148).
 - 26 Phillips C K, Hosea J, Marmor E, *et al.* Ion cyclotron range of frequencies stabilization of sawteeth on Tokamak Fusion Test Reactor[J]. Physics of Fluids B: Plasma Physics, 1992, **4**(7): 2155 - 2164. DOI: [10.1063/1.860484](https://doi.org/10.1063/1.860484).
 - 27 Eriksson L G, Mantsinen M, Borba D, *et al.* Evidence for a wave-induced particle pinch in the presence of toroidally asymmetric ICRF waves[J]. Physical Review Letters, 1998, **81**(6): 1231 - 1234. DOI: [10.1103/physrevlett.81.1231](https://doi.org/10.1103/physrevlett.81.1231).
 - 28 Girardo J B, Sharapov S, Boom J, *et al.* Stabilization of sawteeth with third harmonic deuterium ICRF-accelerated beam in JET plasmas[J]. Physics of Plasmas, 2016, **23**(1): 012505. DOI: [10.1063/1.4939534](https://doi.org/10.1063/1.4939534).
 - 29 Porcelli F, Boucher D, Rosenbluth M N. Model for the sawtooth period and amplitude[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1996, **38**(12): 2163. DOI: [10.1088/0741-3335/38/12/010](https://doi.org/10.1088/0741-3335/38/12/010).
 - 30 Eriksson L G, Johnson T, Mayoral M L, *et al.* On ion cyclotron current drive for sawtooth control[J]. Nuclear Fusion, 2006, **46**(10): S951 - S964. DOI: [10.1088/0029-5515/46/10/s12](https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/10/s12).
 - 31 Zabiego M, Garbet X, Becoulet A, *et al.* Sawtooth stabilization with on-axis ICRH on Tore Supra[J]. Nuclear fusion, 1994, **34**(11): 1489. DOI: [10.1088/0029-5515/34/11/107/meta](https://doi.org/10.1088/0029-5515/34/11/107/meta).
 - 32 Graves J P, Chapman I T, Coda S, *et al.* A new sawtooth control mechanism relying on toroidally propagating ion cyclotron resonance frequency waves: theory and Joint European Torus tokamak experimental evidence[J]. Physics of Plasmas, 2010, **17**(5): 056118. DOI: [10.1063/1.3363201](https://doi.org/10.1063/1.3363201).