DOI：10.19789/j.1004-9398.2023.03.004
文献引用：竹锦霞，王光琼，李强．HL-2A托卡马克上slide-away放电特征研究[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2023，44（3）：23-27. ZHU J X，WANG G Q，LI Q. Characteristics of slide-away discharges in the HL-2A Tokamak [J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2023，44（3）：23-27.

HL-2A托卡马克上slide-away放电特征研究*

竹锦霞[1,2**]，王光琼[2]，李　强[2]

（1. 四川文理学院智能制造产业技术研究院，四川 达州　635000；
2. 四川文理学院智能制造学院，四川 达州　635000）

摘要：托卡马克装置上等离子体不稳定性会被非麦克斯韦分布的逃逸电子激发。逃逸电子在特定条件下会与不稳定性发生反常多普勒共振，此共振结果将降低逃逸电子的能量，减小对装置造成的危害。本文利用电子回旋辐射（ECE）等诊断系统分析了HL-2A上slide-away放电中反常多普勒共振特征。实验结果表明：slide-away放电模式下ECE信号主要有台阶型、指数型、指数-台阶型和双波型4类波形。统计显示不稳定性阈值与等离子体电流以及磁场强度值无线性关系。反常多普勒不稳定性阈值（ω_{pe}/ω_{ce}）统计分布范围约为0.17~0.80，其中最高值分布范围为0.35~0.40。

关键词：托卡马克；slide-away放电；逃逸电子；反常多普勒共振；阈值
中图分类号：O53　　**文献标识码**：A

Characteristics of slide-away discharges in the HL-2A Tokamak*

ZHU Jinxia[1,2**]，WANG Guangqiong[2]，LI Qiang[2]

（1. Institute of Innovation and Development Research，Sichuan University of Arts and Science，Dazhou Sichuan　635000；2. School of Intelligent Manufacturing，Sichuan University of Arts and Science，Dazhou Sichuan　635000）

Abstract：The plasma instability can be excited by the runaway electrons with non-Maxwell distribution in Tokamak. Under certain conditions，the runaway electrons will have abnormal Doppler resonance with instability，which will reduce the energy of runaway electrons and reduce the harm caused by the runaway electrons to the device. In terms of electron cyclotron emission（ECE）and related diagnosis systems，characteristics of slide-away discharges with the anomalous Doppler resonance have been investigated in the HL-2A Tokamak. The experimental results show that ECE signals in slide-away discharge mode mainly have four kinds of waveforms：step type，exponential type，exponential step type and double wave type. The statistical results show that the instability threshold has a wireless relationship with plasma current and magnetic field intensity. The statistical distribution of abnormal Doppler instability threshold（ω_{pe}/ω_{ce}）was 0.17 to 0.80，of which the highest value ranges was 0.35 to 0.40.

Keywords：Tokamak；slide-away discharge；runaway electrons；anomalous Doppler resonance；threshold
CLC：O53　　**DC**：A

收稿日期：2022-04-21
* 国家自然科学基金项目（11775068）；国家磁约束核聚变能发展研究专项项目（2019YFE03010001）
** 通信作者：zjxlfg@126.com

0 引 言

托卡马克等离子体中的超热电子或快电子受到环形电场的影响会被不断地加速到更高的能量,当电子的热速度高于逃逸速度的阈值时,电子成为逃逸电子。麦克斯韦电子分布函数在环形电场的作用下形成一个高能逃逸尾部,当等离子体处于非平衡分布状态时,速度分布的各向异性是激励不稳定性的自由能量源之一。托卡马克等离子体中低密度放电和破裂会产生高通量的逃逸电子,这会严重损伤装置的第一壁材料,特别是下一代大型装置,如国际热核实验堆(international thermonuclear experimental reactor,ITER)[1-3]。当共振阈值超过一定值后,即满足电子等离子体频率低于回旋频率时,部分电子等离子体频率附近的波被激发。逃逸电子与激发的不稳定性发生共振作用,逃逸电子的平行能量转化为垂直能量,螺旋角增加,同步辐射功率增大,逃逸电子能量限制在反常多普勒效应的阈值能量附近,此现象类似于逃逸电子的回旋运动和磁场波纹的谐波分量发生的共振现象[4-5]。在逃逸放电中,当等离子体密度降低,放电会进入slide-away放电,此状态特征为含有大量超热电子,具有等离子体低密度以及低环电压等特征。Slide-away放电通常伴有反常多谱勒共振(anomalous Doppler resonance,ADR)效应,电子回旋辐射(electron cyclotron emission,ECE)信号用于监测逃逸电子的产生和ADR效应,可以为有效减少高能逃逸电子对托卡马克装置第一壁的损伤提供研究方法。逃逸电子的能量以及约束受ADR效应影响很强,可以增加逃逸电子的损失率,大大降低逃逸电子的能量,减小高能电子对装置第一壁的损伤。

中国首个超导托卡马克实验装置合肥超环(HT-7)上详细研究了反常多普勒不稳定性,包括得到不稳定性阈值以及充气对反常多普勒不稳定性的抑制等方面内容[6-10]。除此之外,国内外其他装置上也对逃逸电子的不稳定性进行了研究[11-16]。尽管在slide-away放电模式下,进行了提高等离子体密度对逃逸电子束不稳定性的研究[15],但逃逸电子的抑制方案等还需继续探讨。本文借助HL-2A上的ECE等诊断系统,在已有研究逃逸电子不稳定性的基础上,继续深入对HL-2A上slide-away放电进行研究。

1 实验装置

HL-2A装置是我国第一个偏滤器托卡马克实验装置。主要参数为:大半径R=1.65 m,小半径r=0.40 m,纵向磁场B_{T}=2.8 T[17]。本装置特点是具有一个大体积的封闭式偏滤器。目前本装置上已有70多套诊断系统,丰富先进的诊断系统为托卡马克的相关物理实验研究提供了基础。

当共振阈值超过一定值后,即满足电子等离子体频率低于回旋频率时,部分电子等离子体频率附近的波被激发。逃逸电子与激发的波发生共振的条件为

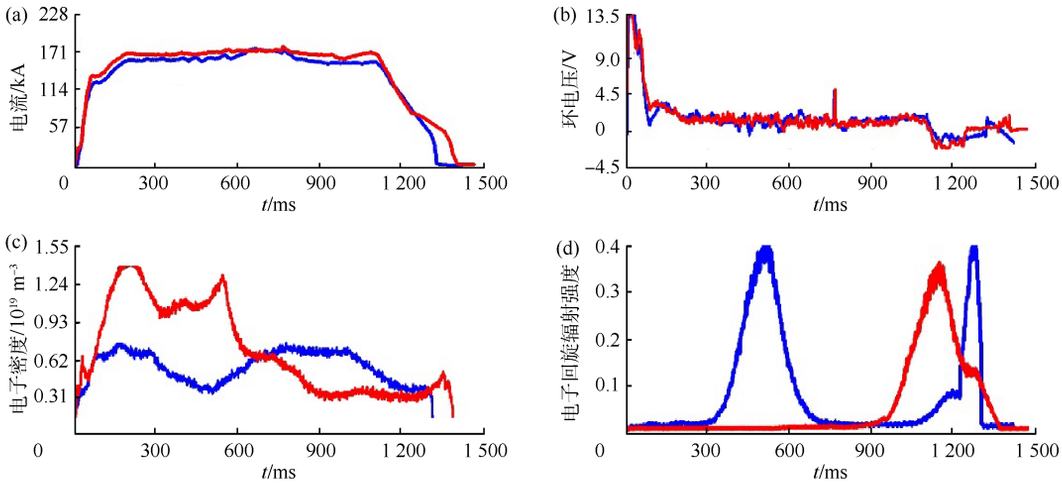
$$\omega_k - n\omega_{\mathrm{ce}} = k_{//}v_{//}, \tag{1}$$

式中:ω_k为电子等离子体频率;n为共振阶数;ω_{ce}为逃逸电子回旋频率;$k_{//}$为波的平行矢量大小;$v_{//}$为逃逸电子平行速度。当n<0时,发生ADR现象,逃逸电子的平行能量向垂直能量转化,引起逃逸电子的螺旋角和同步辐射功率增加,逃逸电子能量降低。由于逃逸电子相对论效应,其下移后的回旋频率被ECE测量系统的二次谐波接收。本实验利用ECE电子回旋辐射诊断来研究ADR,为研究slide-away放电模式下的逃逸电子能量提供测量方法。

2 实验结果

典型的带有ADR效应的低密度slide-away放电如图1所示。在2个不同放电过程中,等离子体电流(I_{p})基本都保持在165 kA。在单波放电中,随着等离子体密度降低,当放电进行到920.0 ms时,随着等离子体密度降低到0.34×10^{19} m^{-3},环电压降低,进入slide-away放电,由于超热电子分布急剧增强,ECE辐射强度指数式急剧增加,此时ECE辐射信号呈指数增长;在双波放电中,当放电达到350.0 ms,等离子体密度降至0.50×10^{19} m^{-3},进入slide-away放电状态,当等离子体密度再次提高,放电到达后期1 200.0 ms左右,ECE辐射强度再次呈台阶式增长,表明逃逸电子再次激发不稳定性波并和波耦合发生2次ADR效应,继续将逃逸电子能量由平行方向转到垂直方向。

根据逃逸电子与不稳定性发生反常多普勒过程的急剧程度,利用实验中观察到的ECE信号,不稳定性过程可以分为快螺旋角散射和正常螺旋角散射[8]。HL-2A上多种不稳定性类型波形已经被观察到。根据实验测量,ECE信号增长幅度及增长次数大致可以分类为台阶型、指数型、指数-台阶型和双波型,如图2所示。为了进一步深入研究反常多普



注:红色表示单波放电;蓝色表示双波放电。

图1　slide-away放电波形

(a)等离子体电流;(b)等离子体表面环电压;(c)等离子体中心线平均电子密度;(d)电子回旋辐射(ECE)强度

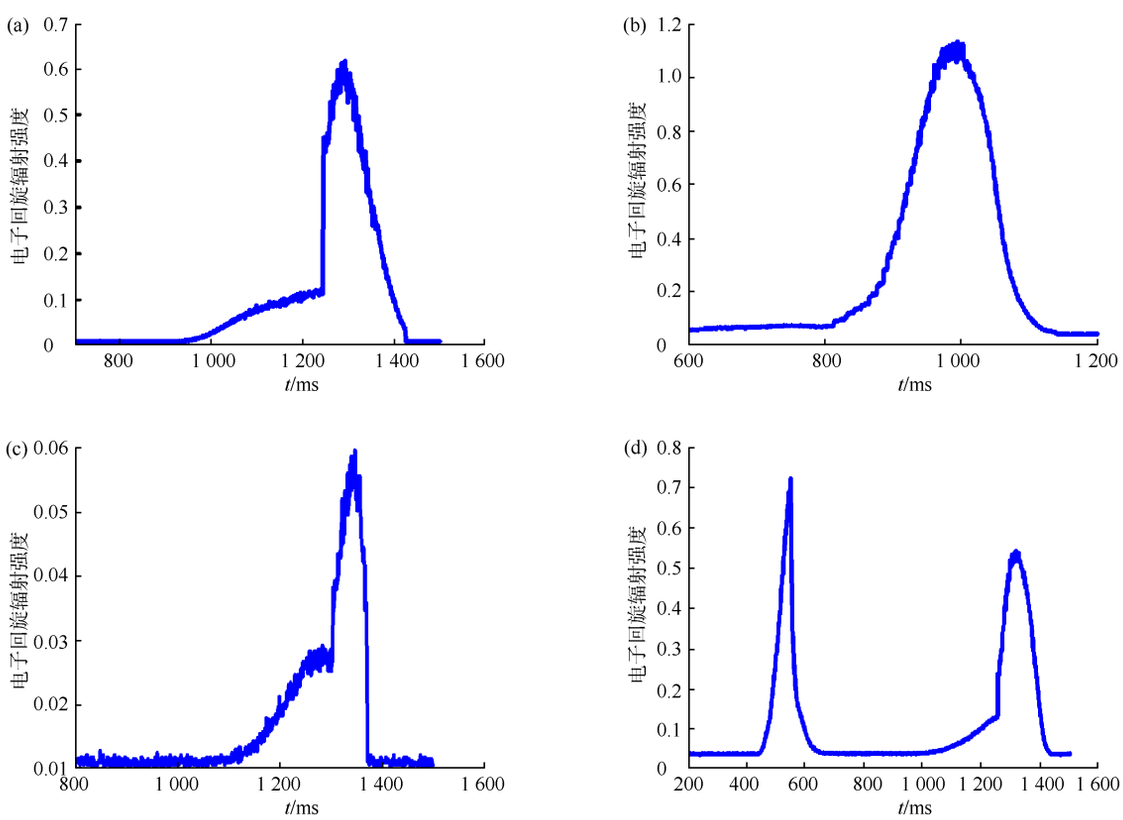


图2　不稳定性中不同类型ECE信号随时间的变化关系

(a)台阶型;(b)指数型;(c)指数-台阶型;(d)双波型

勒不稳定性特性,放大后的反常多普勒不稳定性发生期间的ECE信号如图3所示。ECE信号出现了高频率小振幅的振荡,振荡周期约为2.5 ms。此现象是由于逃逸电子ADR造成的,极短时间内逃逸电子的垂直能量急剧增加,随后出现高频率小振幅振荡的特征。

理论上ADR效应的发生条件为反常多普勒不稳定性阈值(ω_{pe}/ω_{ce})<1.00。根据其他托卡马克上的经验值,一般ADR效应发生的条件是电子等离子体频率与电子回旋频率之比满足反常多普勒不稳定性阈值(ω_{pe}/ω_{ce})<0.30,HT-7等托卡马克上阈值与此相符[6]。然而,不同装置上放电条件不同,不稳定性产生的阈值范围也会不同。反常多普勒不稳定性阈值与磁

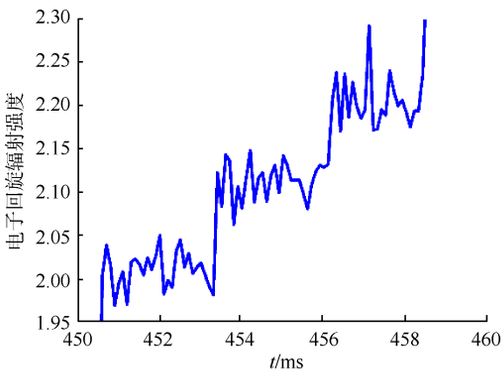


图3　反常多普勒不稳定性发生期间ECE信号

感应强度和等离子体电流的关系如图4所示,根据统计分布,显示了不稳定性阈值与等离子体电流值以及磁场强度值无线性关系,研究表明HL-2A上反常多普勒不稳定性阈值(ω_{pe}/ω_{ce})统计分布范围约为0.17~0.80。

统计分布能反映研究对象总体中所有单位在各组间的分布状态以及分布特征。为了研究不稳定性阈值分布情况,本文以0.05作为统计单元,导出了HL-2A发生反常多普勒不稳定性阈值统计分布如图5所示。反常多普勒不稳定性阈值(ω_{pe}/ω_{ce})最高值范围分布在0.35~0.04。平均值为0.43,标准偏差为0.089,此分布不呈现正态分布。

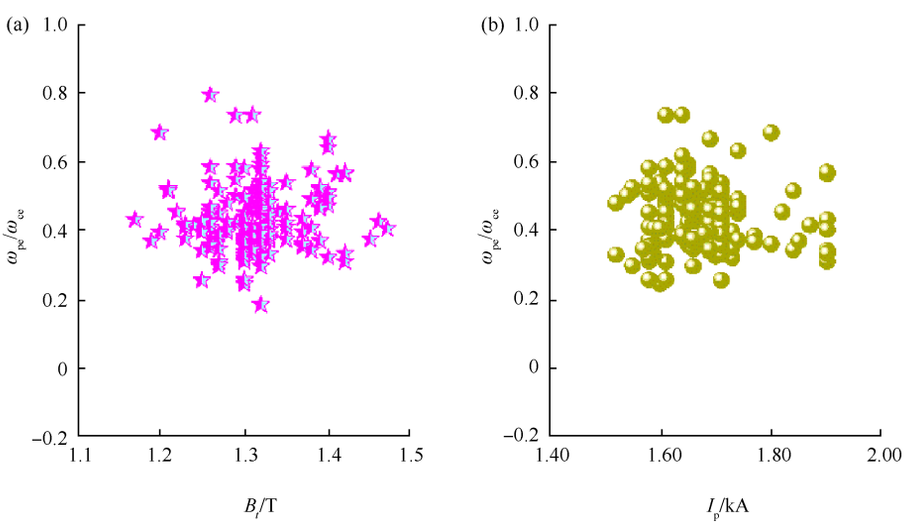


图4　反常多普勒不稳定性阈值与不同参数的关系
(a)磁感应强度;(b)等离子体电流

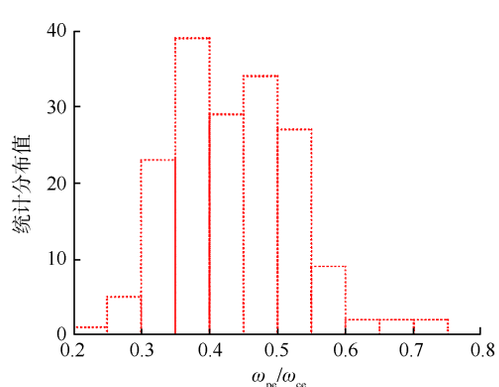


图5　反常多普勒不稳定性阈值统计分布

3　结束语

由于环形电场的作用,电子的速度分布呈现了非麦克斯韦分布,出现了高能逃逸尾部。逃逸电子被激发的不稳定性波散射,逃逸电子的能量将会被减弱,逃逸电子的损失率增加,这样可以有效减少高能逃逸电子对托卡马克装置第一壁的损伤。本文利用ECE等诊断系统分析了HL-2A上slide-away放电中ADR现象。Slide-away放电模式下ECE信号主要有4种类型波形,统计显示不稳定性阈值与等离子体电流值以及磁场强度值无线性关系。反常多普勒不稳定性阈值(ω_{pe}/ω_{ce})统计分布范围是0.17~0.80,最高值范围为0.35~0.40。

参 考 文 献

[1] JASPERS R, CARDOZO N J L, SCHULLER F C, et al. Disruption generated runaway electrons in TEXTOR and ITER [J]. Nuclear Fusion, 1996, 36(3): 367-373.

[2] ESPOSITO B, MARTIN-SOLIS J R, POLI F M, et al. Dynamics of high energy runaway electrons in the Frascati Tokamak Upgrade [J]. Physics of Plasmas, 2003, 10(6): 2350-2360.

[3] GILL R D, ALPER B, EDWARDS A W, et al. Direct observation of runaway electrons during disruptions in the JET Tokamak[J]. Nuclear Fusion, 2000, 40(2): 163-174.

[4] CHEN Z Y, WAN B N, SHI Y J, et al. Resonant interaction of runaway electrons with magnetic field ripple in Tokamak plasmas[J]. Journal of Plasma Physics, 2009, 75(5): 669-674.

[5] KURZAN B, STEUER K H, FUSSMANN G. Dynamics of runaway electrons in the magnetic field of a Tokamak[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(25): 4626-4629.

[6] CHEN Z Y, ZHU J X, JU H J, et al. Characteristics of the runaway electron beam instability in the HT-7 Tokamak[J]. Journal of Plasma Physics, 2009, 75(5): 661-667.

[7] CHEN Z Y, WAN B N, LING B L, et al. Runaway electron beam instability in slide-away discharges in the HT-7 Tokamak[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(11): 3195.

[8] 卢洪伟,查学军,钟方川,等. HT-7托卡马克等离子体逃逸电子螺旋角散射研究[J].原子能科学技术,2013,47(5):711-716.

[9] 王少锋,HT-核测量组. HT-7托卡马克欧姆放电条件下逃逸电子不稳定性的实验研究[J].核技术,2009,32(8):588-591.

[10] 卢洪伟,查学军,胡立群,等. HT-7托卡马克slide-away放电充气对等离子体行为的影响[J].物理学报,2012,61(7):075202.

[11] SANTINI F, BARBATO E, DE MARCO F, et al. Anomalous Doppler resonance of relativistic electrons with lower hybrid waves launched in the Frascati Tokamak[J]. Physical Review Letters, 1984, 52(15): 1300-1303.

[12] LAURENT L, RAX J M. Stochastic instability of runaway electrons in Tokamaks[J]. Europhysics Letters, 2007, 11(3): 219.

[13] LU H W, HU L Q, LI Y D, et al. Investigation of fast pitch angle scattering of runaway electrons in the EAST Tokamak[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(12): 362-367.

[14] CHEN Z Y, KIM W C, YOON S W, et al. Characteristic of slide away discharges in the KSTAR Tokamak[J]. Physics Letters A, 2012, 376(47/48): 3638-3640.

[15] 竹锦霞.提高等离子体密度抑制逃逸电子束不稳定性的实验研究[J].原子与分子物理学报,2014,31(6):941-944.

[16] 竹锦霞.逃逸电子和不稳定性波反常多普勒共振实验研究[J].原子与分子物理学报,2017,34(4):684-688.

[17] ZHU J X, YAO L M, ZHANG Y P, et al. Behaviour of runaway electrons in the HL-2A plasmas with LHCD and ECCD[J]. Journal of Plasma Physics, 2015, 81(6): 475810602.

(责任编辑:兰丽丽)