

# Study on Temperature Distribution of the Upper Divertor in H-Mode Discharges of EAST

Bo Shi<sup>1</sup>, Bin Zhang<sup>2</sup>, Hui Zhang<sup>1</sup>, Jiajia Han<sup>1</sup>, Wenjing Pu<sup>1</sup>, Baoming Wang<sup>1</sup>, Shaoqing Zhao<sup>1</sup>, Jinjiang Zheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teaching & Research Department of Physics, Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei Anhui

<sup>2</sup>Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui

Email: shibo1982\_1982@126.com

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2020; accepted: Apr. 13<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 20<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

In this paper, the superconducting Tokamak device EAST and its infrared temperature measurement diagnostic system are introduced. In the upper single null H-mode discharge with auxiliary heating, the temperature distribution and time evolution of the upper outer target plate of the divertor were measured by the infrared (IR) temperature measurement system. The hot spot and different temperature distribution structures were observed.

## Keywords

EAST, H-Mode, Divertor, Temperature Distribution

---

# EAST装置H模放电中上偏滤器温度分布研究

史博<sup>1</sup>, 张斌<sup>2</sup>, 张辉<sup>1</sup>, 韩佳佳<sup>1</sup>, 浦文婧<sup>1</sup>, 王保明<sup>1</sup>, 赵少卿<sup>1</sup>, 郑进江<sup>1</sup>

<sup>1</sup>陆军炮兵防空兵学院物理教研室, 安徽 合肥

<sup>2</sup>中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥

Email: shibo1982\_1982@126.com

收稿日期: 2020年4月1日; 录用日期: 2020年4月13日; 发布日期: 2020年4月20日

---

## 摘要

本文介绍了全超导托卡马克装置EAST及其红外测温诊断系统, EAST在辅助加热模式下的上单零位形H

**文章引用:** 史博, 张斌, 张辉, 韩佳佳, 浦文婧, 王保明, 赵少卿, 郑进江. EAST 装置 H 模放电中上偏滤器温度分布研究[J]. 核科学与技术, 2020, 8(2): 61-68. DOI: 10.12677/nst.2020.82007

模放电中, 通过红外测温系统对偏滤器上外靶板的温度分布及演化进行了测量, 观测到了热斑及不同的温度分布结构。

## 关键词

EAST, H模, 偏滤器, 温度分布

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

托卡马克中等离子体的约束是聚变研究的中心课题之一。等离子体的约束是指将等离子体的带电粒子和热能约束在其磁场位形中, 很多不稳定性会影响等离子体及其能量的约束, 改变等离子体参数和位形可抑制或激发各种不稳定性, 引起等离子体约束的改善或变坏[1]。H模(high-confinement mode)是1982年最先在ASDEX上发现的高约束模式, 其能量约束时间与L模约束定标相比增加了约1倍, 其出现的最基本的特征是在刮削层以内出现了运输势垒(也称为台基)。H模通常还会伴随着小时间尺度的边界局域不稳定性的爆发, 就是边界局域模(Edge localized modes, ELMs)。ELMs出现时会引起边界等离子体密度和温度的降低, 同时伴随着第一壁释放的 $H\alpha/D\alpha$ 线辐射强度以脉冲的形式出现。有ELMs存在的情况下, 由于ELMs不断排出进入边界的杂质, H模放电在较好的平衡控制下可以维持更长时间, 所以伴随边界局域模的H模被认为是未来聚变堆可行的运行模式[2]。

EAST (Experimental advanced superconducting tokamak)是一个全超导D型截面托卡马克装置, 在2017年已实现了超过100 s的长脉冲H模放电。其主要参数为: 大半径 $R_0 = 1.7\sim 1.9$  m, 小半径 $a = 0.4\sim 0.45$  m, 三角形变 $\delta = 0.4\sim 0.7$ , 拉长比 $\kappa$ 接近1.9 [3] [4]。EAST具有环向对称的16个大型“D”形超导纵场磁体, 产生的纵场可以达到3.5 T, 具有灵活的极向场控制系统, 可实现双零(Double null, DN)、上单零(Upper single null, USN)和下单零(Lower single null, LSN)位形放电[5] [6]。EAST下偏滤器由石墨瓦块、CuCrZr热沉和不锈钢支撑组成, 可承受的热流不超过 $4$  MW/m<sup>2</sup>。上偏滤器, 即ITER-like钨铜偏滤器, 在环向上由80个模块组成, 每个模块包括PFC (Plasma facing components)单元、cassette和支撑结构。钨材料由于具有高熔点、低溅射率、合理的热传导率和强度高等特点, 被选为上偏滤器靶板材料, 可承受的热流为 $10$  MW/m<sup>2</sup> [7] [8]。EAST上安装的辅助加热系统有: 低杂波电流驱动(Low hybrid wave current drive, LHCD)系统, 离子回旋共振加热(Ion cyclotron resonant heating, ICRH)系统, 电子回旋共振加热(Electron cyclotron resonant heating, ECRH)系统和中性束注入(Neutral beam injection, NBI)系统[9] [10] [11] [12]。

高参数长脉冲稳态运行是EAST的主要目标。要实现高参数稳态运行, 辅助加热是必不可少的, 而不同的辅助加热模式给偏滤器靶板带来的温度、热流分布也是不同的。通过对偏滤器下靶板的研究, 已发现低杂波作用下的第二峰值热负荷带、射频波与中性束引起了不同的温度分布等规律[13] [14] [15], 但关于上靶板的分析还较少。本文主要对比研究了射频波混合NBI及只有射频波辅助加热下, EAST高约束模式运行过程中, 偏滤器上外(Upper outer, UO)靶板温度演化与分布, 为装置的安全运行及物理机制的研究提供参考。

## 2. 红外测温诊断系统

2014年, EAST上的红外测温系统升级为大视场红外/可见内窥镜系统, 实现了大视场角 $47^\circ \times 58^\circ$ 的观测, 可对N、O、P窗口的上下偏滤器、低杂波天线以及限制器等重要部件的温度进行监测, 图1给出了大视场红外/可见内窥镜系统的观测范围。

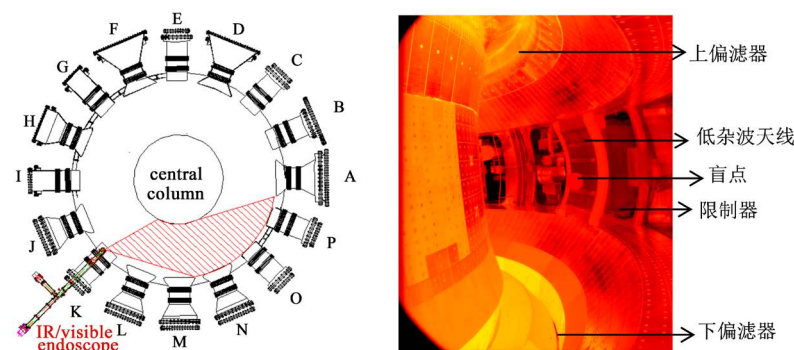


Figure 1. The observation area of IR/visible endoscope system

图1. 红外/可见内窥镜系统的观测范围

大视场红外/可见内窥镜系统主要由内窥镜机械系统、内窥镜光路系统、红外相机和可见相机构成, 如图2所示。系统红外测温采用的是SC7700BB红外相机, 为碲镉汞(mercury cadmium telluride, MCT)探测器红外相机, 探测波长范围为 $2.5 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ , 探测温度范围为 $5^\circ\text{C} \sim 2500^\circ\text{C}$ , 全像素( $640 \times 512$ 像素)采集下最高采样频率为115 Hz, 在小窗口采集模式下( $132 \times 3$ 像素), 最高采样频率可以达到2.9 KHz, 可以实现高温高速采集。

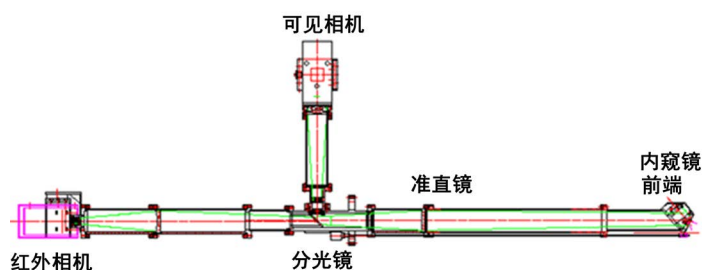


Figure 2. Structure of IR/visible endoscope system

图2. 红外/可见内窥镜系统结构图

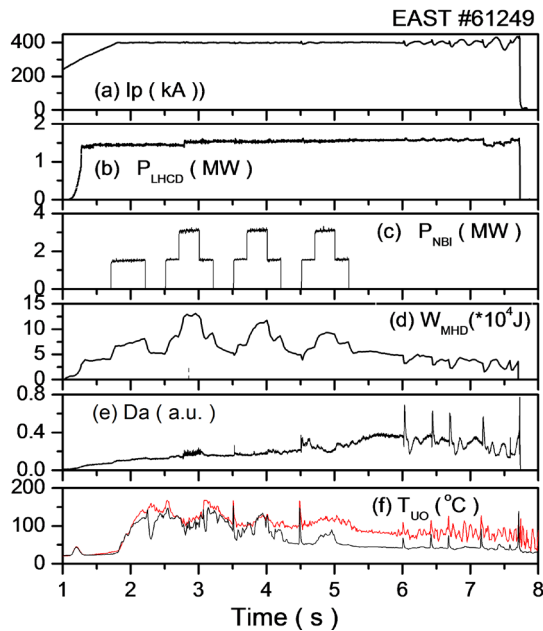
## 3. 实验结果与分析

EAST上开展了大量的高功率上单零位形实验, 使用了低杂波电流驱动、中性束注入、离子回旋共振加热和电子回旋共振加热四种辅助加热手段进行不同的组合。在中性束注入和射频波加热主导放电中, 对偏滤器上外靶板温度时间演化和温度分布进行了测量及分析。本文中的靶板温度数据, 是通过红外诊断系统得到的, 其它数据来自EAST数据库, 由各诊断给出。

#61249是低杂波和NBI共同辅助加热下的上单零H模放电, 如图3所示, 主要放电参数为: 等离子体电流 $I_p \sim 400 \text{ kA}$ , 低杂波注入功率 $P_{\text{LHCD}} \sim 1.5 \text{ MW}$ , NBI注入功率 $P_{\text{NBI}} \sim 1.5 \sim 3.1 \text{ MW}$ 。EAST上配置了两条高功率中性束注入系统, 分别位于A窗口和F窗口, 每条系统可提供4 MW的氖中性束注入。因为NBI的两系统不是同时工作, 造成了图中所示的NBI功率, 也更适合分析NBI对偏滤器靶板温度的影响。

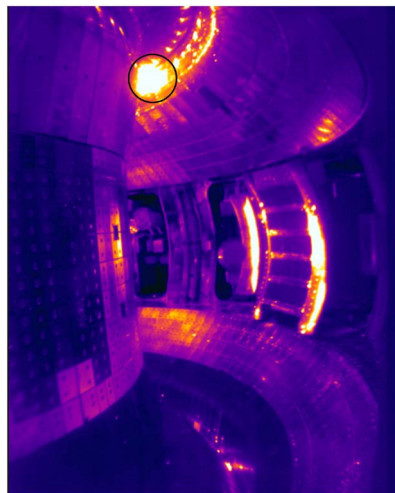
图3(f)给出了偏滤器上外靶板上两个点的温度时间演化, 由于上外靶板上温度最高的区域, 即图4中黑

色圆圈内的区域，温度已饱和，超过了设置测量值的上限，所以选择的分析点并不是温度最高的点，用以分析温度的时间演化。在本次上单零位形放电中可以看到，1.5 MW 的低杂波开始工作时只引起了较小的温度增长，之后温度维持基本不变。NBI 开始工作时功率只有 1.5 MW，储能迅速增加，也引起了温度的较大增长，但较为缓慢，约 2.2 s NBI 停止工作时，温度有所下降，第二次开始工作时也引起了温度的上升，而功率达到 3.1 MW 时，根据等离子体储能、密度及  $D_\alpha$  信号可判断进入 H 模，靶板的温度有所降低，但 NBI 第三和第四次开始工作时，引起了靶板温度的迅速升高，说明造成了较大的能量沉积。



**Figure 3.** Time evolution of the major parameters and the temperature of UO target plate of discharge 61249. (a) Plasma current, (b) Power of LHCD, (c) Power of NBI, (d) Plasma stored energy, (e) Upper divertor  $D_\alpha$  signal and (f) The temperature of UO target plate (two different positions are represented by red and black curves)

**图 3.** #61249 主要放电参数及 UO 靶板温度随时间的演化。(a) 等离子体电流  $I_p$ ，(b) LHW 注入功率  $P_{LHCD}$ ，(c) NBI 注入功率  $P_{NBI}$ ，(d) 等离子体储能  $W_{MHD}$ ，(e) 上偏滤器  $D_\alpha$  信号，(f) UO 靶板温度(红色和黑色曲线给出两个不同位置处的温度)



**Figure 4.** Infrared temperature image of #61249 ( $t = 2.78$  s)

**图 4.** #61249 红外温度图像( $t = 2.78$  s)

图 4 中黑色圆圈内的高温区域, 是在 NBI 开始工作后出现的, 在 NBI 功率较高的情况下, 不但引起了靶板温度的整体升高, 还造成了局部的能量沉积, 在约 2.2 s NBI 暂停工作后, 该区域温度有了很大的下降, 如图 3(f) 中黑色曲线所示。从图 4 中清晰可见一条不连续的负荷带, 也就是打击带区域, 同时部分区域出现了第二负荷带, 这与低杂波在下外靶板形成的温度分布是相似的。图 5 给出了  $t = 2.78$  s 时上外靶板的温度分布曲线, 横坐标是上外靶板上的位置, 方向沿极向, 纵坐标是温度, 此时的低杂波注入功率  $P_{\text{LHCD}} \sim 1.5$  MW, NBI 注入功率  $P_{\text{NBI}} \sim 3.1$  MW, 总注入功率达到了 4.6 MW。选择了 5 个不同位置给出了温度剖面, 其中红色、紫色和蓝色曲线的位置是在图 4 中黑色圆圈区域内, 曲线的平顶是因为温度饱和, 也就是实际的温度会更高。黑色和绿色曲线的位置是在其它区域, 出现了双峰结构, 但与红色、紫色和蓝色曲线相比分布却更窄。

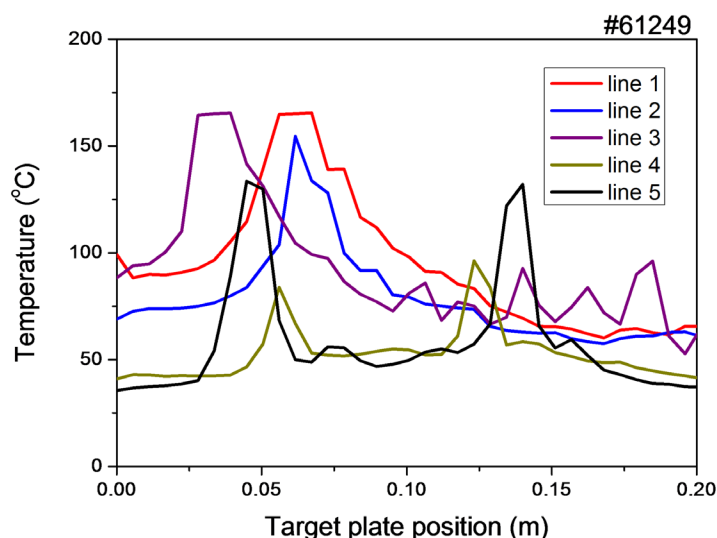
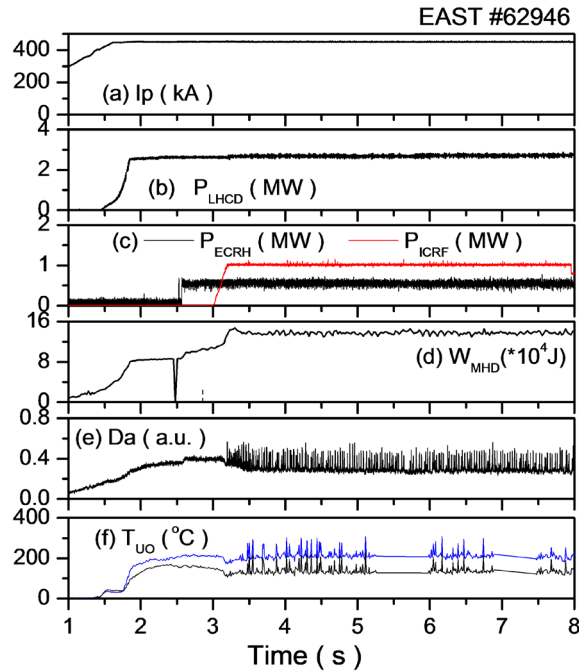


Figure 5. Poloidal distribution curve at different location on the UO target plate of #61249 ( $t = 2.78$  s)  
图 5. #61249 UO 靶板不同位置温度极向分布曲线( $t = 2.78$  s)

#62946 是低杂波、ICRH 和 ECRH 共同辅助加热下的上单零位形 H 模放电, 主要放电参数如图 6 所示: 等离子体电流  $I_p \sim 450$  kA, 低杂波注入功率  $P_{\text{LHCD}} \sim 2.6$  MW, ICRH 注入功率  $P_{\text{ICRH}} \sim 1.0$  MW, ECRH 注入功率  $P_{\text{ECRH}} \sim 0.5$  MW, 由于高温区域的温度也已经达到饱和, 所以图 6(f) 中给出的也并不是最高温度, 选取了未达到饱和的温度点以反映靶板温度的变化, 图中两段直线部分是丢帧造成的。2.6 MW 的低杂波开始工作时储能迅速升高, 也引起了上外靶板温度的迅速升高, 可见有较大热流作用于靶板, 之后温度有较为缓慢的增长, 0.5 MW 的 ECRH 开始工作后基本没有引起温度的变化, 储能有缓慢升高。1.0 MW 的 ICRH 开始工作后引起了储能的较大升高, 同时密度升高及  $D\alpha$  信号下降, 同时靶板温度也有所下降, 进入 H 模并且出现了 ELMs。根据上偏滤器  $D\alpha$  信号可判断 ELMs 的频率为约 50 Hz, 即 I 型 ELMs, ELMs 带来的热流造成了上外靶板温度的迅速升高。

图 7 给出了 #62946 在  $t = 3.26$  s 时的红外温度图像, 此时低杂波、ECRH 和 ICRH 都在工作, 可以看到, 与 #61249 相比, 上外靶板的温度分布要宽, 并且环向分布不对称。这里只给了  $t = 3.26$  s 三种辅助加热都在工作时的图像, 而 2.6 MW 的低杂波开始工作后就在上外靶板形成了较宽且多结构的温度分布, 在 ECRH 和 ICRH 工作后也没有改变温度分布结构, 如图 8 所示。选取了上外靶板上环向不同的两个位置提取了不同时刻的温度数据, 做出图 8, 横坐标是上外靶板位置, 方向是极向, 纵坐标是温度。在 1.94 s 和 2.48 s 时, 只有低杂波在工作, 从黑色和红色曲线可看到此时的温度分布即为分布较宽的多峰值结构。

3.05 s 时 ICRH 刚开始工作, 从蓝色曲线可看到, 温度分布的结构基本没有变化, 打击点处峰值温度有所升高, 此时还未进入 H 模, 6.05 s 时三种辅助加热都在工作且出现边界局域模, 此时的总注入功率达到了 4.1 MW, 温度峰值较高但温度分布结构仍然没有变化。



**Figure 6.** Time evolution of the major parameters and the temperature of UO target plate of discharge 62946. (a) Plasma current, (b) Power of LHCD, (c) Power of ECRH (black) and ICRH (red), (d) Plasma stored energy, (e) Upper divertor  $D_\alpha$  signal and (f) The temperature of UO target plate (two different positions are represented by blue and black curves)

**图 6.** #62946 主要放电参数及 UO 靶板温度随时间的演化。(a) 等离子体电流  $I_p$ , (b) LHW 注入功率  $P_{LHCD}$ , (c) ECRH 和 ICRH 注入功率  $P_{ECRH}$  (黑色),  $P_{ICRH}$  (红色), (d) 等离子体储能  $W_{MHD}$ , (e) 上偏滤器  $D_\alpha$  信号, (f) UO 靶板温度(蓝色和黑色曲线给出两个不同位置处的温度)



**Figure 7.** Infrared temperature image of #62946 ( $t = 3.26$  s)

**图 7.** #62946 红外温度图像( $t = 3.26$  s)

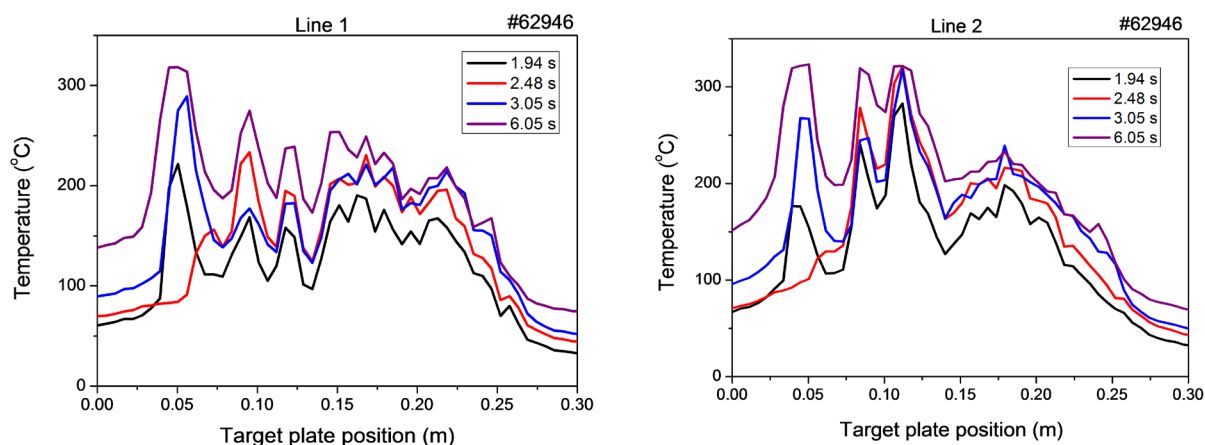


Figure 8. Poloidal distribution curve at different time of the UO target plate of #62946

图 8. #62946 不同时刻极向温度分布曲线

#### 4. 总结

在以上分析的上单零位形放电中，最高注入功率都超过了 4 MW，I 型 ELMs 的频率都小于 50 Hz，在低杂波和 NBI 加热模式下，上外靶板出现了热斑，温度分布出现了双峰值结构，但分布较窄；在低杂波、ECRH 和 ICRH 加热模式下，环向温度分布不对称且出现了较宽的多峰值结构分布，与下单零位形下情况相同。结合 EAST 上的边界诊断，可解释为由于低杂波或 NBI 导致了 SOL 特性的变化，从而导致了热流的极向分布特性不同。

#### 基金项目

本项目受国家磁约束核聚变能发展研究专项(基金号：2018YFE0310400)资助。

#### 参考文献

- [1] 严龙文. 托卡马克等离子体约束[Z]. 核聚变与等离子体物理暑期讲习班, 2007.
- [2] Wagner, F., Becker, G., Behringer, K., *et al.* (1982) Regime of Improved Confinement and High Beta in Neutral-Beam-Heated Divertor Discharges of the ASDEX Tokamak. *Physical Review Letters*, **49**, 1408-1412. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1408>
- [3] Wang, L., Makowski, M.A., Guo, H.Y., *et al.* (2017) Effect of Heating Scheme on SOL Width in DIII-D and EAST. *Nuclear Materials & Energy*, **12**, 221-226. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.01.024>
- [4] Wan, Y. (2006) First Engineering Commissioning of EAST Tokamak. *Plasma Science and Technology*, **8**, 253-254. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/8/3/01>
- [5] Wan, B.N. and Teams, H.T. (2014) Recent Experiments in the EAST and HT-7 Superconducting Tokamaks. *Nuclear Fusion*, **49**, Article ID: 104011. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/10/104011>
- [6] Wan, B.N., Li, J.G., Guo, H.Y., *et al.* (2013) Progress of Long Pulse and H-Mode Experiments in EAST. *Nuclear Fusion*, **53**, Article ID: 104006. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/10/104006>
- [7] Zhou, Z.B., Yao, D.M. and Cao, L. (2015) The Upgrade of EAST Divertor. *Journal of Fusion Energy*, **34**, 93-98. <https://doi.org/10.1007/s10894-014-9765-7>
- [8] Qian, X.Y., Peng, X.B., Wang, L., *et al.* (2016) Evaluation of Performance for the EAST Upgraded Divertor Targets during Type I ELMy H-Mode. *Nuclear Fusion*, **56**, Article ID: 026010. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/2/026010>
- [9] Gong, X.Z., Wan, B.N., Li, J.G., *et al.* (2017) Realization of Minute-Long Steady-State H-Mode Discharges on EAST. *Plasma Science and Technology*, **19**, Article ID: 032001. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/19/3/032001>
- [10] Zhao, L.M., Shan, J.F., Liu, F.K., *et al.* (2010) A 2450 MHz/2 MW Lower Hybrid Current Drive System for EAST. *Plasma Science and Technology*, **12**, 118-122. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/12/1/25>

- [11] Liu, Z.M., Jiang, C.C., Pan, J.J., *et al.* (2017) Long-Pulse Power-Supply System for EAST Neutral-Beam Injectors. *Plasma Science and Technology*, **19**, Article ID: 055602. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aa57f2>
- [12] Sheng, P., Hu, C.D., Song, S.H., *et al.* (2014) The NBI Control System for the EAST. *The Journal of Fusion Energy*, **33**, 529-534. <https://doi.org/10.1007/s10894-014-9700-y>
- [13] Zhang, B., Gan, K.F., Gong, X.Z., *et al.* (2015) Study of Divertor Heat Patterns Induced by LHCD L-Mode Plasmas Using an Infra-Red Camera System on EAST. *Plasma Science and Technology*, **17**, 831-836.
- [14] Gan, K.F., Li, M.H., Wang, F.M., *et al.* (2013) Hot Spots Generated by Low Hybrid Wave Absorption in the SOL on the EAST Tokamak. *Journal of Nuclear Materials*, **438**, S364-S367. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.069>
- [15] Shi, B., Yang, Z.D., Zhang, B., *et al.* (2017) Heat Flux on EAST Divertor Plate in H-Mode with LHCD/LHCD+NBI. *Chinese Physics Letters*, **34**, Article ID: 095201.