

EAST 托卡马克中性气压原位测量实验研究

周德泽^{1,2} 余耀伟^{2*} 曹斌² 潘浩² 左桂忠² 胡建生^{2*}

(1. 安徽大学 合肥 230026; 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)

Experimental Study on the In-Situ Measurement of the Neutral Pressure in EAST Tokamak

ZHOU Deze^{1,2}, YU Yaowei^{2*}, CAO Bin², PAN Hao², ZUO Guizhong², HU Jiansheng^{2*}

(1. Anhui University, Hefei 230026, China; 2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract The density and distribution of neutral particles in the divertor region are very important for studying plasma physics on plasma-wall interaction. The strong magnetic field and electromagnetic environment in the divertor make it difficult to accurately measure the neutral particles density by the normal gauge. This leads to hard in-situ measurement of neutral particle density. A hot cathode ionization gauge (fast ionization gauge) diagnostic system was employed in EAST Tokamak, and experimental studies of in-situ measurement of neutral pressure were carried out. Phase-sensitive detection technology is used to detect the very weak signal in the range of 10 nA–10 μ A under a strong electromagnetic environment. The fast ionization gauge was calibrated in the range of 1×10^{-3} –1 Pa under a 0.35 T magnetic field, and it has a good linear relationship with the pressure. The ion current is also proportional to the filament emission current under the same pressure. Moreover, the sensitivity of the fast gauge will be significantly improved at > 0.35 T. The results show that the fast ionization gauge diagnostic system works very well in 0–1.4 T magnetic fields, and its measurement covers the neutral pressure range of the divertor region. The fast ionization gauge meets the requirement of in-situ measurement of neutral pressure in the divertor region, which provides a powerful tool for studies on divertor physics in EAST and future fusion reactors.

Keywords Fast ionization gauge, Neutral pressure, EAST Tokamak, Magnetic field

摘要 偏滤器区域的中性粒子密度及其分布, 对研究等离子体与壁相互作用的物理过程具有重要意义。偏滤器区域的强磁场及强电磁干扰导致常规规管难以稳定工作, 无法实现对中性粒子密度的原位测量。在 EAST 托卡马克装置搭建了一套热阴极电离规(快规)诊断系统, 并开展了中性气压原位测量研究。利用相敏检测技术, 实现强磁场及强电磁场干扰中 10 nA–10 μ A 微弱信号的准确测量。在 0.35 T 磁场条件下完成了 1×10^{-3} –1 Pa 范围的气压标定, 快规输出结果与气压呈现良好的线性关系。实验结果显示相同气压条件下, 离子流与灯丝发射电流呈线性关系, 强磁场(0.35 T 以上)能够显著提高快规灵敏度。在 0–1.4 T 的实验条件下, 快规诊断系统均能正常工作。快规量程范围覆盖偏滤器区域中性气压变化, 满足偏滤器区域中性气压原位测量需求, 为 EAST 及未来聚变堆偏滤器物理研究提供了有力的工具。

关键词 快速电离规管 中性气压 EAST 托卡马克 磁场

中图分类号: TL62+8

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202208005

托卡马克边界的中性粒子会冷却等离子体边界, 降低等离子体的约束性能, 影响等离子体的稳定运行^[1]。另一方面, 边界中性粒子也能够缓解峰

值热流、保护偏滤器靶板。偏滤器区域的中性粒子密度及分布, 对研究等离子体与壁相互作用的物理过程具有重要意义。如何实现偏滤器中性粒子密

度的准确测量,一直是托卡马克研究的重点问题之一。EAST托卡马克通常使用冷阴极电离规(德国普发公司,PKR251)进行气压测量,但在放电真空室及偏滤器区域,由于强磁场及复杂的电磁环境,导致这种规管不能正常工作,无法实现对中性粒子密度的原位测量。在等离子体放电过程中,中性气压变化十分迅速,同时 M.W. Shafer 等^[2]研究发现,在 DIII-D 的小角偏滤器区域,即使仅间隔 5 cm,中性气压压缩比可达 8 倍以上,因此发展中性气压原位诊断系统对研究托卡马克偏滤器区域的中性粒子密度及分布具有重要意义。

国内外就能够抗强磁场及强干扰的快速电离规(以下简称快规)开展了大量研究, G. Hass 等^[3]最早研制出快规并在 ASDEX 成功应用。ITER 也将快规用于中性气压的原位测量,在气压超过 10 Pa 时,收集极会出现离子流饱和现象,降低发射电流至 0.1 mA 可将测量上限提升至 30 Pa,满足 ITER 的中性气压测量要求^[4]。HL-2A、KSTAR、ADITYA-U 等装置,也利用快规开展了中性气压原位测量研究,明确了中性气压空间分布,并利用原位测量的中性气压作为参考进行等离子体密度的反馈控制^[5-7]。

EAST 是国际上第一个建成的全超导托卡马克装置,拥有类 ITER 的钨铜偏滤器和实现 1000 s 以上高参数长脉冲运行的能力,是国际上极少数有能力开展高参数长脉冲聚变等离子体研究的装置^[8]。由于偏滤器的压缩作用^[9],偏滤器区域会存在很高的中性气压,在长脉冲放电过程中中性气压会随等离子体参数变化而迅速变化。偏滤器区域的中性气压,对研究偏滤器粒子排出及控制燃料粒子再循环非常重要^[10-11]。本文依托 EAST 装置,利用快规诊断系统进行了中性气压原位诊断实验,并研究了放电清洗对快规测量的影响,确定了发射电流与快规测量离子流之间的关系,明确了不同磁场下快规的灵敏度。

1 快规诊断系统结构

快规是一种专门设计的热阴极电离规,采用平行排列的四极板结构,如图 1 所示,快规由灯丝、控制极、加速极和收集极组成。灯丝采用直径 0.6 mm 的钨丝,最大运行电流 30 A,可以抵抗 9 T 强磁场的洛伦兹力而不被拉断。将快规极板沿着垂直于磁力线方向安装,能够实现强磁场下中性气压快速测

量。图 2 显示了快规各个极板工作时的电势,灯丝由于电流的热效应发热并向外发射电子,电子在电场加速下通过控制极和加速极进入电离区,轰击中性粒子并使其电离。在电场作用下,电离区带正电的离子会飞向收集极形成离子流(I_i),电子会打击加速极格栅形成发射电流(I_e)。磁场强度的增加会降低电子的回转半径,电子更容易穿越加速极格栅参与电离中性粒子,提高规管灵敏度,这使得快规能够在强磁场环境下工作。托卡马克装置中有着很强的电磁干扰,即使电离区没有中性粒子被电离,收集极也存在很强的背景噪声,这使得检测快速变化的微小电流信号十分困难。快规的控制极被电子学部分施加高频的方波电势,高电平时灯丝发射的电子能够通过控制极进入电离区,低电平时灯丝发射的电子被完全截止。控制极高电平的大小,会影响规管灵敏度和规管测量的上限^[12]。控制极的方波信号将离子流调制为同频率的信号,利用相敏检测技术^[13]可以将离子流从环境噪声中有效提取,这使得快规有着很强的抗干扰能力。

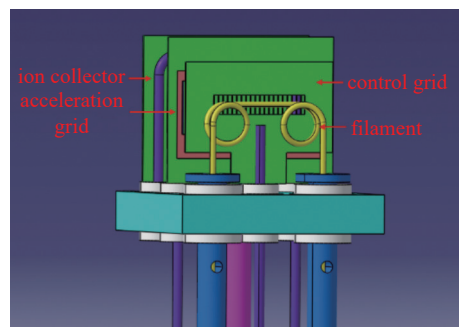


图1 快规结构图

Fig. 1 Structure of fast ionization gauge

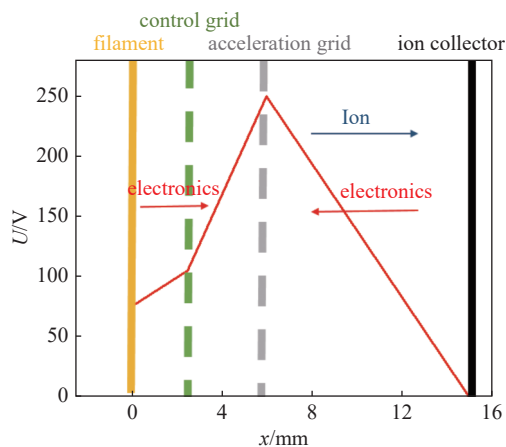


图2 快规电势图

Fig. 2 Potential distribution of fast ionization gauge

2 快规标定

快规在放电真空室使用时,为了保护快规,设计了一个圆柱形不锈钢套筒,在顶部位置切槽并裹覆密集不锈钢网,在实现有效防护的同时,又保证了足够的真空流导,降低灯丝放气导致的电离区气压上涨。

在 EAST 托卡马克装置上,将快规安装在中平面低场侧,开展了快规诊断系统的原位标定实验研究。通过向真空室内充入氦气,待气压平稳后,比较常规规管测得气压与快规输出($I_i/(I_e - I_i)$)之间的关系,实现快规输出与气压值之间的标定。实验结果如图 3 所示,气压与快规输出呈现良好的线性关系。在本实验中将普通规管气压与快规输出分别取对数,然后利用线性拟合对其进行进一步分析,可以得到快规输出与快规测量气压之间的如下关系式

$$p = 55 \times I_i / (I_e - I_i) \quad (1)$$

式中, $p(\text{Pa})$ 为快规测量气压、 $I_i(\text{A})$ 为快规测得离子流、 $I_e(\text{A})$ 为灯丝发射电流。

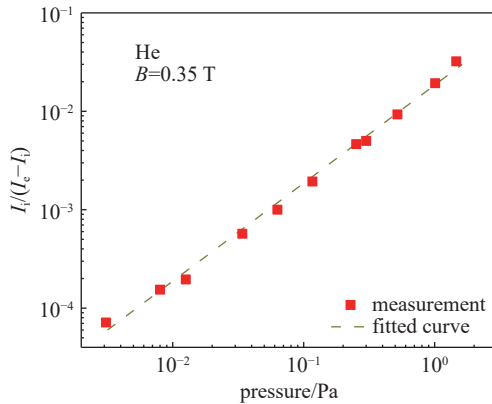


图3 快规标定

Fig. 3 Calibration of fast ionization gauge

图 4 为普通规管测量气压与快规测量气压的对比图,结果显示快规诊断系统测量的气压与常规规管输出的气压在 $2 \times 10^{-3} - 1 \text{ Pa}$ 范围内符合的很好,快规能够在 0.35 T 磁场下准确快速的测量中性气压。快规测量受磁场影响,因此本文中磁场均为快规安装位置的磁场,约为装置中心磁场的 0.7 倍。由于 EAST 放电真空室体积较大,充气系统和泵抽气系统不在同一个位置,装置内部气压在充气过程中不均匀,导致充气过程中普通规管与快规安装位置气压有一定偏差。

当普通规管测量气压低于 $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 时,快规测

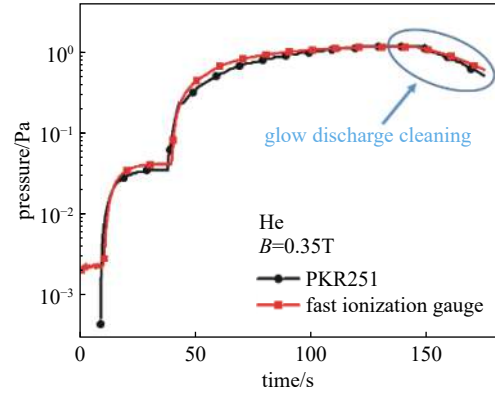


图4 普通规管气压与快规测量气压

Fig. 4 Pressure of PKR251 and fast ionization gauge

量气压基本保持不变,这是由于快规灯丝放气,使得快规电离区的气压保持在一个较高的水平,这一现象影响了高真空度时测量的精度,降低了快规测量的量程。实验中发现快规长期暴露大气首次恢复真空测量时,将灯丝电流设置为 17 A 连续开启 40 min,可以避免明显的长期放气现象。在间隔 10 min 以上的快规测量中,将灯丝预热 30 s 以上,能够有效降低灯丝放气对测量的影响。

3 快规测量实验研究

辉光放电清洗和离子回旋放电清洗,是 EAST 常用的两种壁处理手段。辉光放电清洗期间电极与第一壁之间会有大量正负离子,离子回旋放电清洗会引入射频波干扰。分别在辉光放电、离子回旋放电及改变磁场强度的情况下进行快规测量实验,研究快规诊断系统在 EAST 装置不同实验条件下工作的可靠性及稳定性。

3.1 辉光放电清洗时的快规测量

直流辉光放电清洗通常是在真空室内安装电极作为阳极,装置内壁作为阴极。在阳极施加 1000 V 高压能够将气体击穿,在电场作用下,电子会向阳极运动,带正电的离子向阴极运动^[14]。EAST 可以在强磁场环境下实现辉光等离子体放电^[15],但由于磁场的存在,辉光启辉气压在 1.5 Pa 左右,且需要较高的气压维持辉光,气压降到 0.5 Pa 以下时,辉光熄灭。图 4 显示了辉光启辉前后的快规测量,在 135 s 时辉光启辉,在 175 s 辉光熄灭时停止测量。由于辉光启辉前后快规测量离子流都与气压保持着良好的线性关系,因此快规测量气压与普通规管测量气压很好的对应。辉光电极施加的高压,以及

气体击穿产生的离子和电子没有对快规测量造成明显的影响,得益于控制极高频电势设计,使得向第一壁移动的离子没有对收集极信号造成干扰。

3.2 离子回旋放电清洗时的快规测量

EAST托卡马克装置采用脉冲式离子回旋放电清洗,一般向放电真空室内充入氦气至 3×10^{-2} Pa左右,将纵场电流设置为2000 A,此时磁场约为0.35 T。快规测量实验时采用占空比为10%、周期为5 s的离子回旋脉冲进行放电清洗。图5显示了离子回旋放电清洗的功率和离子回旋放电清洗时常规规管测得的气压及快规测到气压的变化。从图中可以看出,离子回旋放电期间气压基本稳定在 3.2×10^{-2} Pa左右,波动段为 3.6×10^{-2} Pa。离子回旋放电脉冲会使吸附在第一壁的粒子解吸,使得气压有 4×10^{-3} Pa左右的上涨。在非等离子体放电实验期间,常规规管的采样率为1 Hz,因此普通规管输出的气压不能显示1 s内具体的气压变化过程。常规规管测量的气压并不是精确到 10^{-5} Pa量级的准确值,但是可以对气压短时间小范围内波动做定性表征。

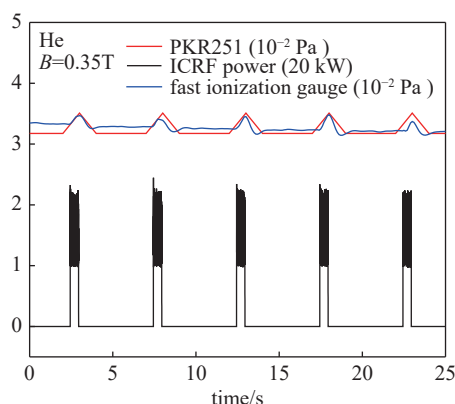


图5 离子回旋注入功率与装置气压

Fig. 5 ICRF injection power and neutral pressure in EAST vacuum vessel

离子回旋放电清洗会引入射频波,在离子回旋放电清洗期间进行快规测量研究,验证快规诊断系统抗干扰能力。离子回旋放电脉冲会产生高能粒子轰击第一壁,使吸附在第一壁的粒子解吸,会造成气压的周期性上涨^[16],这一过程在快规测量的气压中被完整的体现出来。快规诊断系统有着最高10 ms的时间分辨率,能够准确测量气压快速变化的过程。由于快规被金属屏蔽罩笼罩,信号传输使用的是同轴屏蔽线,因此射频波对快规测量的影响

有限,快规诊断系统能够在离子回旋放电清洗时正常工作。

3.3 发射电流与快规测量离子流的关系

快规系统正常工作时,电源对灯丝施加15–22 A电流,使灯丝发热后发射电子,电子一部分打在加速极形成发射电流,一部分进入电离区,轰击中性粒子使其电离,可以用发射电流值评估进入电离区的电子数量。在离子回旋放电清洗期间,分别在不同发射电流条件下进行实验。如图6所示,在气压为 3.2×10^{-2} Pa时,发射电流与离子流呈良好的线性关系。

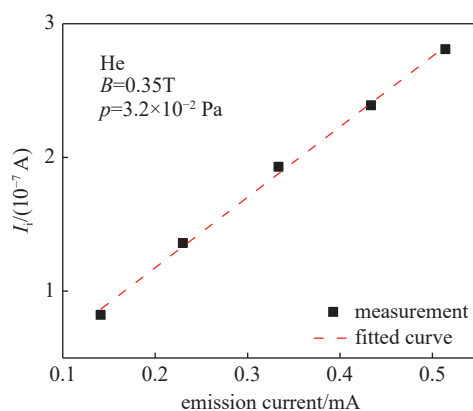


图6 离子流随发射电流演化

Fig. 6 The relationship between ion current and emission current

在理想条件下,离子流应该与发射电流成正比关系,但对发射电流与离子流使用线性拟合分析发现他们的比例关系被一个很小的偏移量修正,一方面是因为测量有一定的误差,另一方面是由于在快规的实际工作中,参与电离的电子和打在加速极的电子不是标准的正比关系。在气压较低时,离子流信号很弱,需要较高的发射电流;在气压大于1 Pa后,收集极会出现离子流饱和,此时需要较低发射电流,因此需要根据不同的气压条件调节发射电流。发射电流与离子流之间的线性关系说明,不同发射电流的实验条件下,都可以通过采集发射电流与离子流,利用式1的对应关系,实现中性气压的测量。

3.4 磁场强度对快规测量的影响

EAST托卡马克装置使用氦气作为工作气体,因此氦气是偏滤器粒子排出的主要气体。图7显示了不同磁场下快规测量离子流随氦气压强演化的曲线,在强磁场和无磁场时,离子流与气压都呈现

很好的线性关系。对快规输出与气压进行拟合,结果显示不同磁场的拟合曲线之间并不平行,低气压段时强磁场与无磁场的灵敏度之比要高于高气压段,因此本文给出的灵敏度之比是个范围。实验结果显示 0.35 T 时快规灵敏度约为无磁场时的 6–9 倍,0.7 T 时快规灵敏度约为无磁场时的 10–12 倍,1.4 T 时快规灵敏度约为无磁场时的 9–15 倍。加速极格栅透光率为 80%,栅网宽度约为 0.12 mm,灯丝热发射的电子,会在电场中做类斜抛运动,电子会直接打在加速极格栅或在多次震荡后打在加速极格栅。随着磁场强度的增加,电子的回转半径会进一步降低,电子更容易通过加速极格栅,从而更多次的进入电离区参与电离中性粒子,因此强磁场条件下,快规输出会比无磁场条件下大约一个量级。快规诊断系统的输出在不同磁场条件下都与气压保持很好的线性关系,因此快规能够在偏滤器区域强的磁场环境中使用。

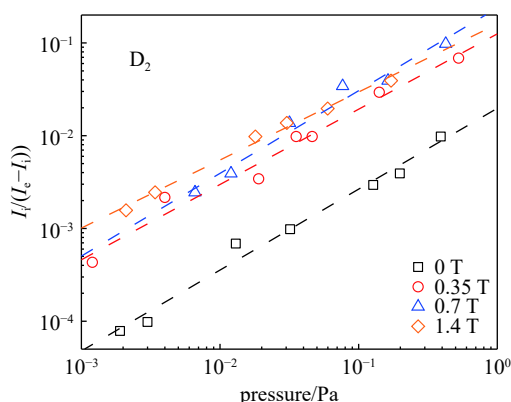


图7 不同磁场下快规输出随气压演化

Fig. 7 The output of the fast ionization gauge changes with pressure under different magnetic fields

4 总结

在 EAST 托卡马克装置,搭建了一套快规诊断系统,并开展了中性气压原位测量实验研究。在磁场强度为 0.35 T,气压为 1×10^{-3} –1 Pa 范围内进行了标定,实验结果表明,强磁场环境下快规输出依然与气压保持良好的线性关系,快规能够实现强磁场环境中中性气压测量。研究了辉光放电清洗下的快规测量,实验结果显示气体击穿产生的离子不会影响收集极离子流信号。进行了离子回旋放电清洗下的快规测量,实验结果表明快规的屏蔽结构,能够很好的抵抗电磁波及射频波干扰。开展了不

同磁场下的快规测量,实验结果显示在 0–1.4 T 的实验条件下,快规-均能正常使用,快规的输出在 0.35–1.4 T 磁场下仍与气压保持良好的线性关系,强磁场会显著提高快规的灵敏度。

快规诊断系统能够在强磁场、强电磁波及射频波干扰的环境下工作,实现了 EAST 托卡马克装置的中性气压的原位测量。在等离子体放电过程中,偏滤器区域的中性气压对研究等离子体与壁相互作用的物理过程具有重要意义。快规诊断系统完全满足偏滤器区域的中性气压原位测量的要求,为 EAST 及未来聚变堆偏滤器物理研究提供了有效的工具。

参 考 文 献

- [1] Chen Qiumin, Zhu Wu, Wang Gensheng, et al. Research on vacuum gauge and instrument for fast measurement against strong interference[J]. *Chinese Journal of Vacuum*, 2012, 49(2): 1–4 (陈秋敏, 朱武, 汪根生, 等. 抗强干扰快速测量真空规管及仪器的研究[J]. *真空*, 2012, 49(2): 1–4(in chinese))
- [2] Shafer M W, Covele B, Canik J M, et al. Dependence of neutral pressure on detachment in the small angle slot divertor at DIII-D[J]. *Nucl Mater energy*, 2019, 19: 487–92
- [3] Haas G, Bosch H. In Vessel Pressure Measurement in Nuclear Fusion Experiments with ASDEX Gauges[J]. *VACUUM*, 1998, 51(1): 39–46
- [4] Mackel F, Arkhipov A, Scarabosio A, et al. Experimental exploration of the upper measuring limit of pressure gauges for ITER by variation of instrumental parameters[J]. *Fusion Eng Des*, 2019, 146: 622–5
- [5] Wang M, Yan L, Hong W, et al. Neutral pressure measured by fast ionization gauge in HL-2A[J]. *J Nucl Mater*, 2007, 363: 1472–5
- [6] Kim M, Kim K, Lee H. The new attempts for the in-vessel pressure gauge operation in the KSTAR plasma[J]. *Fusion Eng Des*, 2019, 146: 2011–4
- [7] Patel K, Nagora U, Joshi H, et al. Real-time density feedback control in ADITYA-U tokamak[J]. *J. Instrum*, 2022, 17(6)
- [8] Wan Baonian, Xu Guosheng. Experimental advanced superconducting tokamak[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015(23): 157–68 (万宝年, 徐国盛. EAST超导托卡马克[J]. *科学通报*, 2015(23): 157–68(in chinese))
- [9] Schmitz O, Feng Y, Jakubowski M, et al. Stable Heat and particle flux detachment with efficient particle exhaust in the island divertor of wendelstein 7-X[J]. *Nucl Fusion*,

- 2021, 61(1)
- [10] Motojima G, Masuzaki S, Morisaki T, et al. Particle control in long-pulse discharge using divertor pumping in LHD[J]. *Phys. Scr*, 2022, 97(3)
- [11] Yu Y W, Hu J S, Zuo G Z, et al. Control of hydrogen content and fuel recycling for long pulse high performance plasma operation in EAST[J]. *Nucl. Fusion*, 2019, 59(12)
- [12] Scarabosio A, Haas G. Behaviour of the ASDEX pressure gauge at high neutral gas pressure and applications for ITER[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 988: 238–42
- [13] Ren Xueyu, Huang Yao, Xue zi, et al. A digital phase-locking subdivision method for grating moire signal[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021(3): 25–34 (任雪玉, 黄垚, 薛梓, 等. 一种光栅莫尔信号数字锁相细分方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021(3): 25–34(in chinese))
- [14] Cao Hongmei, Yu Yaowei, Cao Bin, et al. Upgrade and experimental studies of EAST glow discharge cleaning electrode[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2022(2): 94–8 (曹红梅, 余耀伟, 曹斌, 等. EAST辉光放电清洗电极的升级及实验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2022(2): 94–8(in chinese))
- [15] Wan B N, Liang Y, Gong X Z, et al. Recent Advances in EAST Physics Experiments in Support of Steady-state Operation for ITER and CFETR[J]. *Nucl. Fusion*, 2019, 59(11)
- [16] Brakel Rudolf, Hartmann Dirk A, Grigull Peter. Eckhard. ICRF Wall conditioning experiments in the W7-AS stellarator[J]. *J Nucl Mater*, 2001,(290-293): 1160–1164