

EAST 超导托卡马克装置真空室壁处理的研究*

李加宏[†] 胡建生 王小明 余耀伟 吴金华 陈跃 王厚银

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2012年6月14日收到; 2012年7月30日收到修改稿)

壁处理技术被广泛应用于托卡马克装置上, 以降低装置本底杂质水平, 改善器壁的再循环. 自 2008 年起, EAST 面向等离子体的第一壁采用全碳材料, 由于特殊的石墨晶体多孔结构, 具有高放气率以及对 H_2O , H_2 等杂质气体的高吸附性, 从而使等离子体放电前期的装置真空室壁处理尤为关键. 本文介绍了 EAST 装置真空室壁处理的实验系统, 并研究了装置烘烤与不同工作气体及工作参数下的直流辉光放电清洗对杂质粒子的清除效果. 实验结果表明: EAST 装置真空室在经过长时间的前期壁处理后, 显著地降低了真空室内壁的出气率与本底杂质浓度, 这对随后进行的等离子体放电实验非常有必要.

关键词: 壁处理, 直流辉光放电清洗, 烘烤

PACS: 52.80.Vp, 52.55.Fa

1 引言

超导托卡马克装置是用来研究磁约束等离子体核聚变的实验装置, 其真空室要求无油超高真空本底, 尽可能降低杂质对等离子体行为的影响; 同时, 对于工作气体及其同位素必须降低粒子再循环, 以利于等离子体放电的持续进行. 壁处理技术被广泛应用于托卡马克装置上, 以降低装置本底杂质水平, 改善器壁的再循环^[1]. 自 2008 年起, EAST 面向等离子体的第一壁采用全碳材料, 由于特殊的石墨晶体多孔结构, 具有高放气率以及对 H_2O , H_2 等杂质气体的高吸附性, 故等离子体放电^[2] 前期的装置壁处理尤为关键.

EAST 装置在实验前内部改造中, 真空室在长时间暴露大气之后, 装置内壁吸附了大量的 H_2O , N_2 和 O_2 等气体, 以及由于装置内部的各项工程安装等操作而残留的油及其他碳氢化合物等成分, 需要进行高强度的壁处理来获得高真空状态, 为等离子体放电提供良好的器壁环境. 采用烘烤与直流辉

光放电清洗两种方法来降低 EAST 装置等离子体放电前内真空室杂质水平, 提高真空室极限真空度. 本文研究了烘烤与直流辉光放电清洗的实验结果及优化, 同时比较了不同参数下直流辉光放电的清洗效果.

2 实验系统

2.1 烘烤系统

目前 EAST 内真空室的烘烤系统根据装置本体与窗口结构的不同, 采用两种烘烤方法. 热沉结构的第一壁及真空室夹层利用流过内外层间的热氮气进行烘烤, 窗口及抽气管道使用电加热丝烘烤. 其中第一壁及夹层通常烘烤温度为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ (最高温度可达 $350\text{ }^\circ\text{C}$), 窗口及抽气管道通常烘烤温度低于 $150\text{ }^\circ\text{C}$. 图 1 所示为 EAST 第一壁热沉结构及内部回气管道^[3], EAST 内真空室共有 9 路在不锈钢支撑上安装导热性非常好的铜热沉回路, 其中第一壁石墨安装在热沉上面, 热

* 中国科技部 ITER 计划专项 (批准号: 2010GB104002)、国家自然科学基金 (批准号: 10705030) 和中日等离子体和核聚变大学群项目资助的课题.

[†] E-mail: lijiahong@ipp.ac.cn

沉内部安装有可通热氮气和冷却水的管道回路, 在等离子体放电前壁处理期间, 可在热沉回路通以

较高温度的热氮气, 从而达到装置烘烤出气的目的.

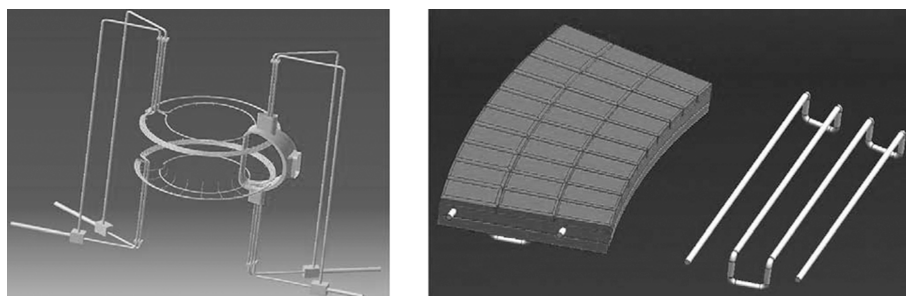


图1 具有热 N_2 烘烤回气管道的 EAST 热沉结构

2.2 直流辉光系统

直流辉光放电是在真空室内置入电极作为阳极, 装置内壁作为阴极, 两极间加上一定的电压后, 就会在电极和内壁间形成电场, 真空室内残余的电子和离子在电场的作用下分别向阳极和阴极运动, 形成电子雪崩效应, 在外界电压的作用下构成了稳定的直流辉光放电^[4]. 在直流辉光放电清洗中, 离子在电场的作用下向阴极即真空室内壁运动, 在电场强度很高的阴极位降区加速运动而轰击内壁, 使壁表面即使结合能很高的杂质也能被解析而逸出, 在真空泵组的作用下被抽出真空室外, 从而实现直流辉光放电对装置内壁的清洗.

EAST 装置内部共安装有四个辉光电极, 环向对称的安装在 A, C, G 和 K 窗口附近, 图 2 所示为电极的结构图. 电极材料是不锈钢, 电极与装置内壁间通过陶瓷绝缘. 电极与装置内壁间装有不锈钢护套, 以防止辉光放电期间近距离起弧或是由于近距离高电场产生的高能粒子损害电极附近的真空室内壁. 电源引线经过碗状陶瓷和不锈钢护套保护, 确保与装置的绝缘以及足够的机械强度.

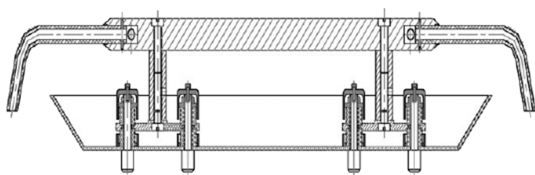


图2 EAST 辉光电极结构图

EAST 直流辉光系统共有四个独立的电源, 分

别为四个辉光电极供电, 设计空载输出直流电压为 0—2000 V, 工作电压为 150—900 V, 输出电流为 0—15 A, 电源最大输出功率 15 kW, 具有手动和远程双重控制功能.

2.3 抽气系统

EAST 装置内真空室的抽气系统可分为主抽气系统、偏滤器抽气系统和低杂波抽气系统^[5]. 安装在 EAST 装置的水平窗口的主抽气管道直径为 Φ 0.8 m, 长约 6 m, 配备了 3 台 F-400 型、名义抽速为 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的涡轮分子泵和 1 台 3K-T 型、名义抽速为 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的复合分子泵 (对 N_2 的总标称抽速为 $12.9 \text{ m}^3/\text{s}$) 以及 4 台低温泵, 并有两套罗茨泵机组及一套分子泵机组构成的前级抽气机组. 偏滤器抽气系统包括在 EAST 装置的顶部和底部共有 6 台低温泵 (单台标称抽速: 氢气 $13 \text{ m}^3/\text{s}$, 水汽 $17 \text{ m}^3/\text{s}$, 空气 $5.8 \text{ m}^3/\text{s}$), 以及在装置内部主要用来抽出在放电期间偏滤器位置的杂质气体的内置式偏滤器低温泵. 低杂波抽气系统包括 1 台 F-400 型涡轮分子泵和 1 台低温泵. 稳定可靠的抽气系统为壁处理期间的杂质粒子抽除提供了必要的大抽速.

2.4 壁处理充气系统

EAST 放电清洗时工作气体由电磁阀 (型号为 VDE016) 控制, 通过充气管道从水平 J 窗口 (与内真空室主抽管道的窗口位置环向对称) 充入装置, 电磁阀已接入 PLC 控制系统^[6], 可直接通过计算机控制流量或气压. 该电磁阀有气压反馈控制和流

量控制两种模式, 气压反馈控制模式是通过气压设定值和实际值反馈控制进气量, 而流量控制模式则是直接控制阀门的开度, 该模式下的进气率与气源的压力近似成正比关系. 由于气体消耗较大, 随着辉光放电的进行, 气源的压力会明显降低. 为了维持恒定的进气率, 通常使用压强反馈模式来控制充气, 以保证辉光能够在稳定的气压下维持.

2.5 测量系统

EAST 前期壁处理期间主要使用规管 (PKR251) 来测量装置内的真空度, 通过四级质谱仪 (RGA200) 监测气体成分的分压变化 [7]. 由于在直流辉光放电期间工作气压较高, 通常在 5×10^{-2} — 10 Pa 之间 (常用工作气压为 5×10^{-1} Pa), 而质谱计的工作气压要求小于 10^{-2} Pa. 为了能够准确监测辉光放电期间气体成分的变化, EAST 上安装了一套差分测量系统, 包括一台 RGA200 质谱仪和一只 PKR251 规管, 从而能够在高压下进行分压测量. 差分系统测量得到的分压值需要进行标定才能够得到装置内的气体分压. 通常在低气压质谱仪能够工作的范围内同时测量装置和差分的分压和总压, 得到差分系统对不同气体成分的不同抽速, 然后根据辉光时差分系统与装置的气体总压的比值, 计算出装置内的分压, 进而评估和计算辉光对杂质的清除率.

3 实验过程与讨论

EAST 装置在等离子体放电前期, 主要的壁处理方法包括烘烤 (窗口、抽气管道以及内部件) 和直流辉光放电清洗两种方式. 装置烘烤能够解析与器壁表面结合能较低的主要以物理吸附方式存在于壁上的杂质, 而与表面结合能较高的主要以化学吸附方式与第一壁结合的杂质, 必须通过放电清洗才能够清除.

3.1 烘烤壁处理

在真空室内壁表面吸附的气体会按照一定的解析速率从器壁的表面释放出来, 而解析速率与气体分子与表面的结合能以及表面的温度密切相关,

近似于 (1) 式所示:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{c}{t_0} \exp \left[-\frac{E_d}{kT} \right], \quad (1)$$

其中 c 是气体分子的表面浓度, 假设小于一个单分子层, E_d 是气体分子的结合能, T 为器壁表面温度. 解析速率与气体分子与表面的结合能以及表面的温度密切相关. 根据 (1) 式, 可以得出随着器壁表面温度的逐渐上升, 气体的释放速率会达到一个最大值, 经过高温烘烤处理后的器壁的放气速率会大大降低, 但是对于结合能比较高的原子或者分子 ($E_d > 2.5$ eV), 即使温度烘烤至 700 K, 烘烤时间再长也难以使其解析.

图 3 为 2010 年冬季 EAST 装置物理实验的前期壁处理过程中内真空室烘烤温度与真空度演化曲线图. 可以看出壁温由 50 °C 上升至 200 °C 后, 内真空室真空度由 4.2×10^{-5} Pa 上升至 1.1×10^{-3} Pa, 并在该气压下维持, 质谱显示此时的装置主要的气体成分为 H_2O , 油及碳氢化合物. 在经历了 3 天约 200 °C 烘烤之后, 装置充 N_2 后, 又恢复 200 °C 的烘烤, 装置的真空度由 2.2×10^{-5} Pa 上升至 1.6×10^{-4} Pa, 极限真空与杂质水平相比均降低 1—1.5 个量级. 在随后维持 200 °C, 气压及杂质水平逐步下降, 表明器壁表面结合能较低的大部分杂质都已经被清除掉, 继续单纯依靠烘烤已经难以再进一步有效的清除杂质.

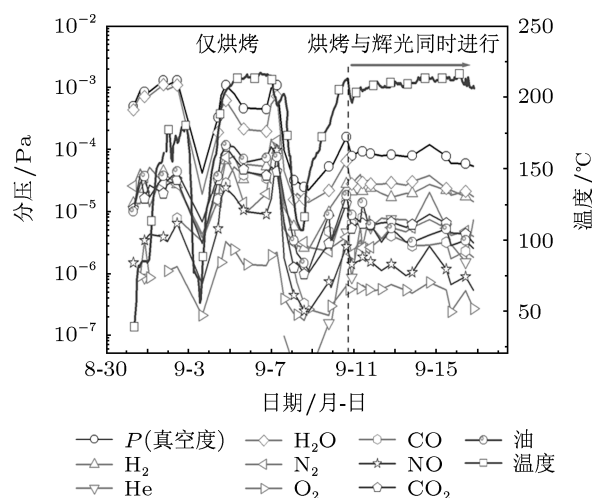


图 3 2010 年 EAST 冬季实验烘烤温度与压强的演化

对于烘烤不能清除的杂质可以进一步通过放电清洗的方法来去除, 此时保持第一壁较高的烘烤温度, 继续保持壁上杂质的解析, 同时也能够明显增强直流辉光放电的清洗效果.

3.2 直流辉光壁处理

对于烘烤不能够清除的杂质可以通过放电清洗的方法去除. 放电清洗的原理概括起来主要是放电产生的高能粒子(包括离子、电子、光子以及电荷交换产生的中性粒子等)轰击壁表面, 将能量传递给表面的杂质气体分子或原子, 破坏它们与壁表面的结合键, 或者与它们发生化学反应生成气态化合物, 从而使它们从壁上解析出来并被抽出真空室外. 本文主要比较了不同工作气体与不同工作参数下的直流辉光放电清洗效果.

3.2.1 不同工作气体的比较

EAST 装置放电前期主要采用 He 辉光和 D_2 辉光放电来清除真空室内杂质, He 直流辉光放电是最常用的清洗方法, He 是惰性气体, 很难与其他气体发生化学反应, 同时其具有极低的壁滞留率而被用来在各种条件下的辉光清洗. 而 D_2 的化学活性特点是易于与其他气体成分反应生成气态的碳氢化合物, 化学解析产生的清除效果远高于 He 辉光.

图 4 为 2010 年 9 月 14 日 EAST 装置放电前, 连续 D_2 辉光和 He 辉光的分压强演化曲线, 除了 D_2 辉光引起的壁滞留外, 可以认为 D_2 辉光和 He 辉光处于相同的壁状态下, 而且都是使用了两个对称放置的辉光电极, 电流均为 2 A. 在维

持充气的情況下停止辉光放电清洗, 观察质谱中分压的变化. 从图 4 中明显看出, 由于 D_2 的化学活性导致在 D_2 辉光中生成了大量的 CO (原子质量数 (AMU28)), C_2D_4 (AMU32), D_2O (AMU20), CH_2D_2 (AMU18) 以及 C_2D_2O 或 CO_2 (AMU44), 这对有效清除第一壁中的 C, H, O 以及其化合物有着明显的效果. 而 He 辉光仅对 CO 或 D_2 辉光残留的 C_2D_4 (AMU28) 有非常微弱的作用, 其他气体成分在整个 He 辉光过程中无任何变化. 从图 4 中同样可以看出, 在停止相同气压的工作气体 D_2 和 He 辉光清洗后, 质谱显示 He 辉光后的 AMU4 的成分比 D_2 辉光后低 1.5 个量级, 这表明活性气体 D_2 在具有较高的清除率的同时, 也很容易被石墨俘获而滞留在第一壁内, 一般采用在 D_2 辉光后进行 He 辉光清洗以实现快速去除滞留在壁中 D_2 的目的.

Ar 是分子量较大的惰性气体, Ar 辉光放电清洗的机制主要是通过碰撞传递能量导致壁上其他物质的解析和释放. 在 EAST 装置上进行了 Ar 辉光实验, 发现 Ar 辉光在较低的工作气压 (< 0.1 Pa) 下即可实现稳定的辉光, 具有较高的分子平均自由程. 由图 5 可以看出, 在维持充气不变的情况下停止辉光放电清洗, Ar 辉光过程中 HD (AMU3), D_2 和 He (AMU4) 的分压是辉光停止后的 6 倍, 由此可见其对滞留在石墨壁里的 D_2 , He 等具有很高的清除效果.

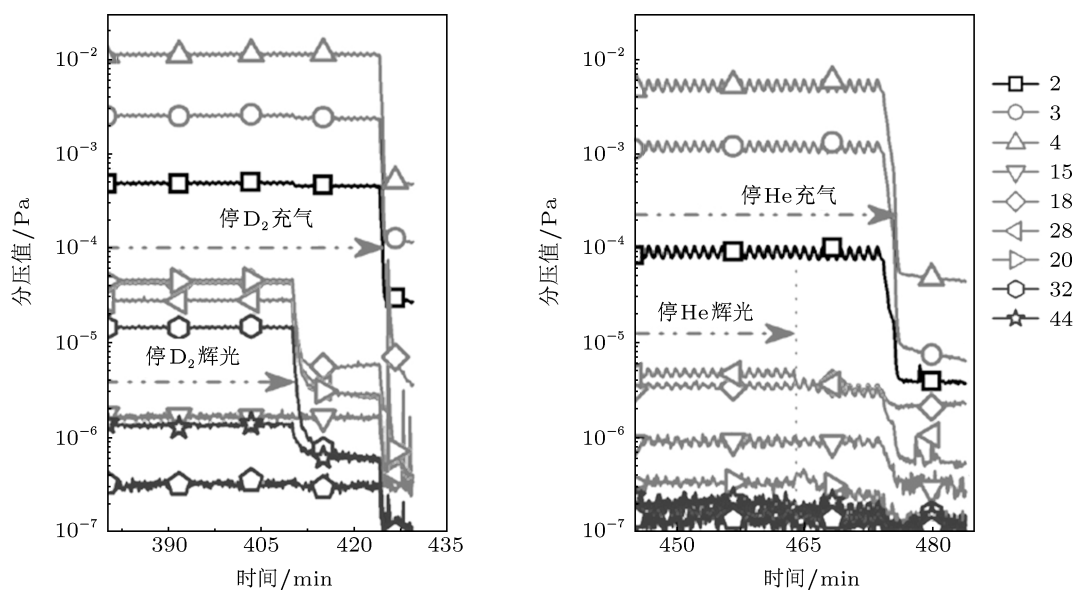


图 4 2010 年 EAST 实验前期 D_2 辉光与 He 辉光过程分压比较

从气体解析截面考虑, 在 250—350 eV 的轰击能量下, Ar 辉光的气体解析界面是 He 的 10 倍, 但是在该条件下 Ar 很容易被石墨壁俘获而滞留在壁内, 所以在实验过程中一般很少使用 Ar 辉光清洗, 但在一些特殊条件下, 如 He, D₂ 辉光清洗后需要对装置进行 He 质谱检漏, 此时进行较短时间的 Ar 辉光清洗即可达到快速清除装置内滞留的 He 和 D₂, 从而提高检漏 He 本底值, 提高最小可检漏率的目的.

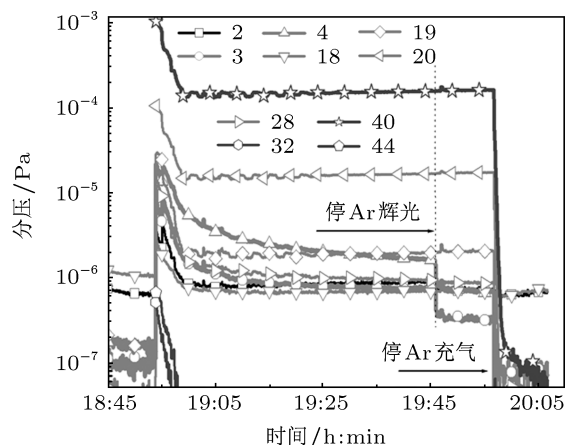


图 5 EAST 上 Ar 辉光差分质谱数据

3.2.2 不同清洗参数的比较

对于实验中最常用的 He 直流辉光, 在 EAST 上进行了不同气压、电流和电极对清洗效果影响的深入研究. 在实验中研究了 5, 1, 0.8 和 0.1 Pa 四个不同气压下, 辉光放电清洗对杂质的清除率的影响, 如图 6 所示. 发现对杂质的清除率随气压的升高而增加, 但是当气压升高到 5 Pa 时辉光不稳定, 很容易产生拉弧, 同时高压导致涡轮分子泵机组的抽速急剧下降. 综合这些因素, He 辉光对杂质的最高清除率的合适气压值为 0.8 Pa.

研究了不同辉光放电电流对清除率的影响. 如图 7 所示, 在 0.8 Pa 的工作气压下, 可以看到 6 A 的 He 辉光对 H₂ 的清除率是 2 A 的 1.9 倍, 而对于其他气体成分如 H₂O, O₂ 和 CO₂ 等杂质的清除率却随着电流的增加而降低, 可能原因是过高的电流导致这些气体被电离, 从而影响被泵抽除. 对于在相同气压及相同电流的条件下, 比较了两个电极与四个电极对杂质的清除效果, 发现增加两个电极并没有对杂质的清除率带来明显的变化, 而在两个辉光电极工作的情况下即可获得非常均匀的等离子体, 基本满足了实验的需要.

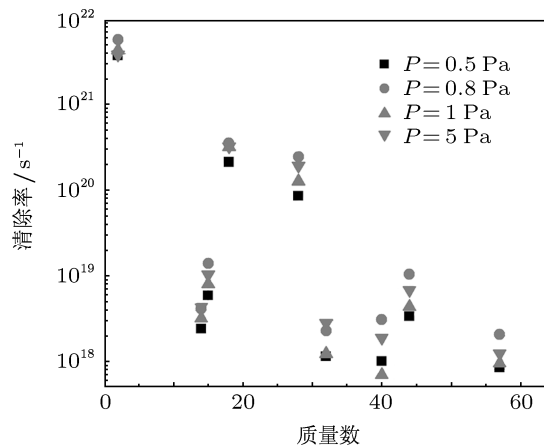


图 6 不同工作气压下的 He 辉光的清除率

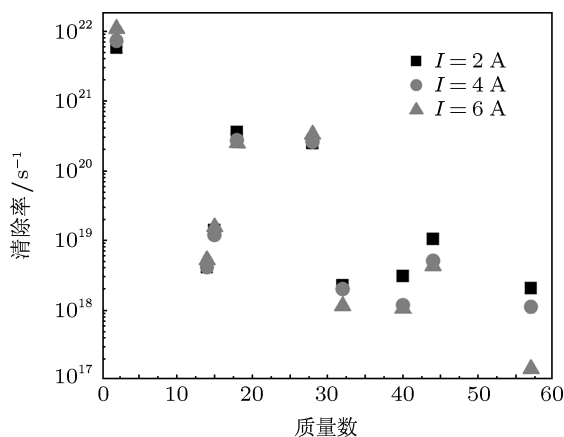


图 7 不同电流下的 He 辉光的清除率

4 实验运行与结果

2010 年冬季 EAST 物理实验中, 共进行了约 307.8 h 的烘烤处理 (约 200 °C), 并在壁温维持 200 °C 的条件下进行约 98.4 h 的以 D₂ 辉光为主的放电清洗, 烘烤对 H₂O, CO₂ 以及油与其他碳氢

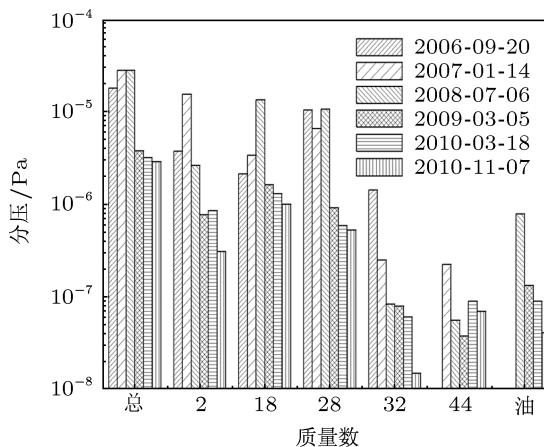


图 8 EAST 各轮实验放电前真空度及气体分压比较

化合物有非常有效的清除效果, H_2 分压随着辉光放电清洗的进行而逐步降低, 装置在等离子体放电前期壁处理过程中, 总的 H_2 清除量大约为 65.8 g, 总的 H_2O 的清除量大约为 485 g.

装置内壁总的出气率由 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 下降至 $1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 如图 8 所示, 放电前真空室极限真空度达到 $3.2 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ (壁温 100°C), 其中 H_2 占 80%, 为残余气体的主要成分, 远远超过了托卡马克装置运行所需要的 $1.3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 真空

度条件.

2010 年冬季物理实验中, EAST 装置在经过长时间的前期壁处理后, 显著地降低了真空室内壁的出气率与本底杂质浓度, 真空度及杂质水平也优于历年实验前水平, 良好的放电前的壁状态主要归功于维持高温烘烤的条件下, 间隔进行合适参数的 D_2 辉光与 He 辉光的清洗处理, 这为随后进行的等离子体放电实验提供了良好的真空环境.

-
- [1] Hu J S, Li J G, Wang X M 2006 *J. Nucl. Mater.* **350** 9
- [2] Huang Q C, Luo J R, Wang H Z, Li C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 286 (in Chinese) [黄勤超, 罗家融, 王华忠, 李翀 2006 物理学报 **55** 286]
- [3] Hu J S, Wang X M, Li J H, Wu J H, Chen Y, Wang H Y, Yang D W, Luo N C, Li S F, Li G Y, Wang L, Yu Y W, Dou R C, Hu Q S, Bao L M, Zhao Y P, Li J G, EAST vacuum and wall conditioning group 2009 *Fusion Eng. Design* **84** 2167
- [4] Xu X J, Zhu D C 1995 *Gas Discharge Physics* (Shanghai: Fudan University Press) p121 (in Chinese) [徐学基, 诸定昌 1995 气体放电物理 (上海: 复旦大学出版社) 第 121 页]
- [5] Li J H, Hu J S, Wang X M, Wang L, Chen Y, Yu Y Y, Wang H Y, Wu J H, Zuo G Z, Tang M, Zhuang H D 2010 *Vacuum* **46** 11 (in Chinese) [李加宏, 胡建生, 王小明, 王玲, 陈跃, 余耀伟, 王厚银, 吴金华, 左贵忠, 唐明, 庄会东 2010 真空 **46** 11]
- [6] Chen Y, Zhang Y, Yang D W, Wang L, Hu J S, Li J H, Wu J H, Wang X M, EAST vacuum group 2012 *Phys. Procedia* **32** 14
- [7] Wang H Y, Hu J S, Wang X M, Chen Q, Cao B, Yu Y W, Wu J H, Chen Y, Li J H, EAST vacuum group 2012 *Phys. Procedia* **32** 235

Wall cleanings for pre-treatment on EAST*

Li Jia-Hong[†] Hu Jian-Sheng Wang Xiao-Ming Yu Yao-Wei Wu Jin-Hua
Chen Yue Wang Hou-Yin

(*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(Received 14 June 2012; revised manuscript received 30 July 2012)

Abstract

Wall cleaning has been used popularly on tokamaks to reduce impurities and fuel recycling. Since 2008, the plasma facing components of EAST have been all of graphite. Due to the special crystal structure of graphite, high outgassing rate and strong absorption of hydrogen gas are induced. The wall cleaning is in particular important for the pre-treatment before the plasma operation of the machine. In this article, we introduce the wall conditioning system on EAST, and study the removal efficiency of device baking and glow discharge cleaning in different working gases and at different operating parameters. The long duration baking and GDC cleaning in EAST notably reduce the wall outgassing, and impurity radiation. After the cleanings, plasma is easily obtained, which is beneficial for the plasma physics experiment.

Keywords: wall conditioning, glow discharge cleaning, baking

PACS: 52.80.Vp, 52.55.Fa

* Project supported by the Chinese Special Project for ITER (Grant No. 2010GB104002), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10705030), and the JSPS-CAS Core-University Program on Plasma and Nuclear Fusion.

[†] E-mail: lijiahong@ipp.ac.cn