

射频驱动频率对托卡马克装置 辉光放电清洗特性的影响

黄向玫* 曹诚志 胡毅 周军 高霄燕 崔成和
(核工业西南物理研究院 成都 610225)

Influence of RF Driven Frequency on the Tokamak Glow Discharge Cleaning Characteristics

HUANG Xiangmei*, CAO Chengzhi, HU Yi, ZHOU Jun, GAO Xiaoyan, CUI Chenghe
(Southwestern Institute of Physical, Chengdu 610025, China)

Abstract In order to study the influence of RF driven frequency on the glow discharge cleaning characteristics, RF frequencies of 2.1 MHz, 13.56 MHz and 40.68 MHz are employed to perform radio-frequency glow discharge cleaning (RF-GDC) during the initial discharge phase of HL-2M. Results show that the breakdown pressure of 2.1 MHz RF-GDC is 2.0×10^{-1} Pa, while that of 13.56 MHz is 5.6×10^{-1} Pa with a preset power of 1500 W. However, the breakdown happens at 9.2×10^{-1} Pa only when DC bias voltage is added for the 40.68 MHz case. The impurity cleaning efficiency is also studied by monitoring the residual gas composition during the RF-GDC with different driven frequencies. Results show that, due to the more heated electrons at low frequency, the 2.1 MHz RF-GDC has the highest impurity yield. Additionally, although the 40.68 MHz RF-GDC has the lowest power coupling efficiency, its impurity yield is still higher than 13.56 MHz RF-GDC due to its high plasma density. The results indicated that the 2.1 MHz RF-GDC has the best cleaning performance. However, because the power coupling efficiency of different frequency is different, which also have an impact on the cleaning efficiency, the impedance matching problem should be solved to improve the coupling power in the next step.

Keywords Glow discharge cleaning, Driven frequency, Breakdown pressure, Cleaning efficiency

摘要 HL-2M装置初始放电阶段,分别采用2.1 MHz、13.56 MHz和40.68 MHz三种频率的射频电源开展了射频-直流辉光放电清洗实验,研究射频驱动频率对放电清洗特性的影响。预加载功率1500 W时,2.1 MHz放电的击穿气压为 2.0×10^{-1} Pa,13.56 MHz放电为 5.6×10^{-1} Pa;而40.68 MHz叠加直流偏压后在 9.2×10^{-1} Pa实现击穿。对三种频率辉光放电清洗实验过程中的残余气体成分进行监测,结果表明杂质产额由高到低为:2.1 MHz>40.68 MHz>13.56 MHz。由于低频放电具有较多的加热电子数,所以2.1 MHz放电的杂质产额最高。而虽然40.68 MHz放电的功率耦合效率最低,但由于具有高的等离子体密度,其杂质产额高于13.56 MHz。可见2.1 MHz的射频-直流辉光放电在HL-2M装置初始放电阶段具有最优的清洗特性。然而由于不同频率的功率耦合效率不同,同样会对清洗效率产生影响,因此下一步首先应解决阻抗匹配问题以提高耦合功率。

关键词 辉光放电清洗 射频驱动频率 击穿气压 清除效率

中图分类号: TL62+8

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202211006

在聚变等离子体研究中,器壁处理的主要目的是移除器壁上的杂质,控制工作气体再循环,以获得高品质的等离子体。辉光放电清洗是托卡马克装置器壁处理的一种常规手段,主要通过粒子轰击

使器壁表面吸附的杂质由于物理或化学溅射而解吸、脱氢和脱水等,从而降低器壁表面的碳、氧污染和离子轰击感生解吸系数^[1]。

射频-直流辉光放电清洗是射频和直流共同作

用的辉光放电模式。通常在多匝螺旋线圈上施加射频功率使得线圈内产生射频电流, 由此感应而来的时变电磁场会加速电子使其与中性粒子发生非弹性碰撞, 实现等离子体的产生和维持; 再将直流偏压施加到电极上形成射频-直流辉光放电清洗。该放电清洗模式具有低气压下更容易击穿, 运行稳定和清洗效率高等优点, 最早是在德国于利希研究中心的 TEXTOR 托卡马克装置上开发应用^[1-2], 之后广泛应用于 DIII-D、JET、KSTART 和 HL-2A 等托卡马克装置, 并应用于开展硼化、硅化等真空室原位壁处理实验^[3-6]。

射频电源的驱动频率直接影响感应电场的强弱, 从而影响等离子体特性。研究发现辉光放电过程中的电子能量分布函数、等离子体密度分布等均与驱动频率相关, 而且低频和高频放电输入功率的变化对等离子体参数的影响不尽相同^[7]。可见, 驱动频率是影响辉光等离子体清洗特性的重要参数。在托卡马克装置射频-直流辉光放电清洗的实验中, 通常采用 13.56 MHz 作为射频驱动频率, 虽然早期 DIII-D、JET 上曾经采用其它频率开展过射频-直流辉光放电清洗^[8-9], 但并没有开展频率对放电清洗特性的影响的相关研究。因此, 有必要开展相关研究, 对比不同频率的辉光清洗特性, 探索在聚变装置上获得更优清洗特性的辉光清洗技术, 为聚变装置开展等离子体实验提供良好的器壁条件。

HL-2M 是中国新一代先进磁约束核聚变实验研究装置, 于 2020 年 12 月实现首次等离子体放电, 其设计的等离子体电流为 2.5 MA, 离子温度为 1.5 亿度。为了顺利实现 HL-2M 装置的初始等离子体放电, 在 HL-2M 真空室内布置了 4 组板式电极以开展直流辉光放电清洗^[10]。此外, 在真空室内安装了一组螺旋线圈电极, 在 HL-2M 装置初始等离子体放电阶段, 分别采用频率为 2.1、13.56 和 40.68 MHz 三种频率的射频电源开展了射频-直流辉光放电清洗实验, 初步探索射频驱动频率对放电击穿气压以及清洗效果的影响。

1 实验过程

HL-2M 装置真空室为由 20 个 D 形截面扇形段组成的环状结构, 大半径为 2.6 m, D 型截面宽 1.6 m, 环高 3.02 m, 真空室体积 42 m³^[11]。

本实验采用螺旋线圈电极进行射频辉光, 一组板式电极进行直流辉光。如图 1 所示, 射频电极为

由直径 10 mm 不锈钢棒绕制的 6 匝螺旋线圈, 水平安装于真空室 6 号扇段中平面位置。线圈一端悬空, 一端通过陶瓷绝缘用螺钉固定在真空室上, 并连接线缆穿透与真空室外的射频电源及匹配网络相连接。实验采用的 2.1 MHz 和 40.68 MHz 的射频电源功率调节范围为 0~2 kW, 13.56 MHz 射频电源的功率调节范围为 0~5 kW, 三套射频电源均配有自动阻抗匹配器。直流电极位于真空室 18 号扇段中平面位置, 环向位置距离射频电极 160°, 采用恒流源工作模式。



图1 射频电极

Fig. 1 RF antennas

HL-2M 装置初始放电阶段的辉光放电清洗实验采用氢气(H₂)作为工作气体, 由气体质量流量控制器控制送气流量, 由多组复合真空计监测真空室压强, 由差分四极质谱系统监测真空室残余气体成分^[12]。

实验的主要过程如图 2 所示: (1) 向真空室内送入氢气, 真空室压强到 $\sim 10^{-2}$ Pa 后在螺旋线圈上加载射频功率, 继续送气直到气体击穿, 真空室内观察到亮光; (2) 继续送气, 并在直流电极上加载直流偏压, 直流电极与真空室壁之间形成等离子体; (3) 减小送气量使真空室压强降低, 真空室内辉光强度增加; (4) 真空室内形成均匀辉光。图 3 为实验过程的主要残余气体成分的变化。

实验中, 通过改变驱动频率以及加载功率, 对不同驱动频率和功率的击穿气压和残余气体成分变化进行监测和分析, 以评估驱动频率对清洗特性的影响。

2 实验结果与分析

2.1 射频频率对击穿气压的影响

分别采用 2.1、13.56 和 40.68 MHz 的射频电源给螺旋线圈电极预加载一定功率后, 继续向真空室送入 H₂ 直至气体击穿。各驱动频率成功击穿时的

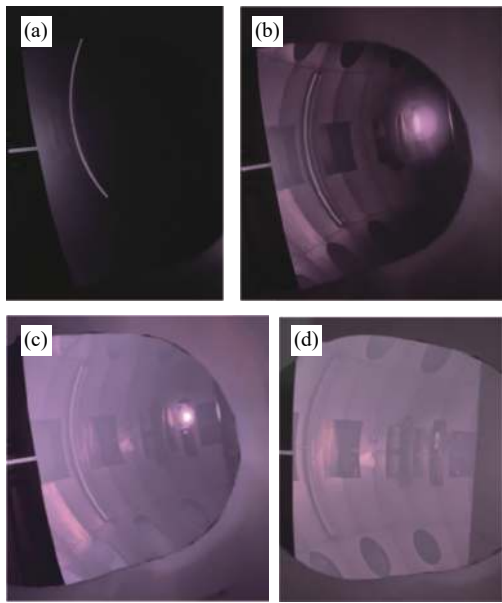


图2 射频-直流辉光放电清洗主要过程: (a) 气体击穿; (b) 叠加直流辉光等离子体; (c)降低气压; (d) 真空室内形成均匀等离子体

Fig. 2 Procedure of RF-GDC: (a) breakdown, (b) add DC-GDC, (c) reduce pressure, (d) uniform plasma formed

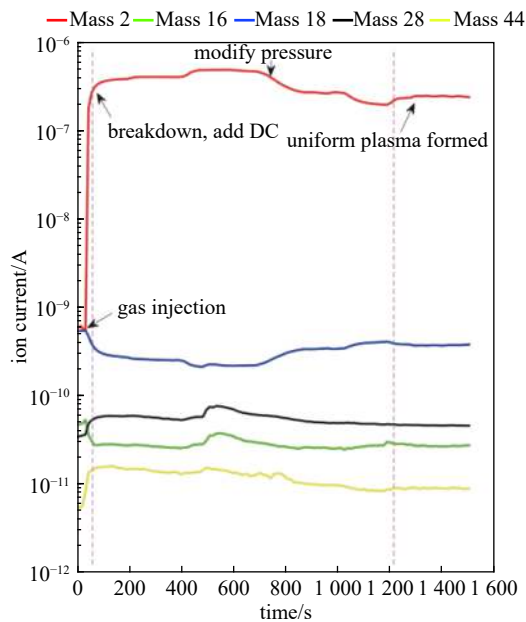


图3 射频-直流辉光放电清洗过程的残余气体成分

Fig. 3 Residual gas composition during RF-GDC

真空室压强在表 1 给出。

如表中所示,对于相同设定功率的不同驱动频率,耦合功率完全不同。设定功率为 1500 W 时,2.1 MHz 放电的耦合功率大于 13.56 MHz 放电;而设定功率为 2000 W 时,2.1 MHz 放电的耦合功率却小于 13.56 MHz 放电。40.68 MHz 放电功率耦合效

表 1 不同频率和功率的击穿气压

Tab. 1 Breakdown pressure at different frequency and power

驱动频率/MHz	设定功率/W	耦合功率/W	击穿气压/Pa
2.1	1500	700	2.0×10^{-1}
2.1	2000	590	2.7×10^{-1}
13.56	1500	560	5.0×10^{-1}
13.56	2000	700	4.6×10^{-1}
40.68	1500	260	9.2×10^{-1} *

备注: 40.68 MHz 叠加直流偏压后击穿

率非常低,小于 20%。这主要是阻抗匹配问题。在等离子体放电过程中,等离子体自身产生的阻抗是负载阻抗的一部分,而等离子体的阻抗随着放电条件和放电参数而改变。由于 HL-2M 装置真空室体积庞大,结构复杂,等离子体自身的阻抗较为复杂。此外,负载阻抗还与射频电极的结构、位置等密切相关。而采用的匹配网络虽然有自动调节功能,但其调节范围有限,不一定能实现较好的阻抗匹配,从而导致功率反射,等离子体的吸收功率减小。因此不同工况下,等离子体的吸收功率不同。

由于高频电场增加了电子与气体分子的碰撞频率,2.1 MHz 和 13.56 MHz 辉光放电在 $<5\times10^{-1}$ Pa 实现击穿。对于相同驱动频率,击穿气压随着耦合功率,即等离子体吸收功率的增加而降低,这与 HL-2A 装置上的研究结果 [7] 一致。而等离子体吸收功率差不多时,2.1 MHz 放电相较于 13.56 MHz 放电的击穿气压更低。对于高频 13.56 MHz 的辉光放电,离子由于惯性较大,只能响应时间平均的电场,只有电子可以响应射频电磁场的变化,能发生碰撞电离的粒子数目较少;而低频 2.1 MHz 的辉光放电,等离子体中的各种荷电粒子的运动均可以跟上射频电磁场的变化,能发生碰撞电离的粒子数目较多^[13]。所以离子和电子的共同运动使得 2.1 MHz 放电在更低的压强下实现了击穿。

对于甚高频 40.68 MHz 的辉光放电,其具有更多的高能电子,理论上更容易实现击穿。然而在实验过程中一直将压强增加到 $\sim9\times10^{-1}$ Pa 也未实现击穿,在一组直流电极上加载直流电压后才实现了击穿。实现感应放电有两个前提,一是匹配器电容与线圈电感满足谐振条件,二是感应线圈产生电容耦合放电击穿所需的高压^[14]。与直流放电类似,射频放电的击穿电压与气体压强的关系同样满足帕邢定律,具有一个最小值,而感应线圈的电压取决于

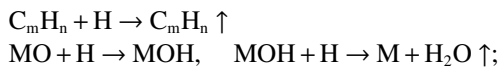
耦合功率。由于阻抗匹配问题, 40.68 MHz 放电虽然加载了 1500 W 功率, 但等离子体耦合功率只有 260 W, 可能没有达到击穿所需要的高压, 所以未能实现击穿。由于继续增加射频功率对实际托卡马克装置射频辅助辉光放电清洗的意义不大, 因此没有进一步增加 40.68 MHz 放电的功率进行研究。

结果表明, 针对 HL-2M 装置的实际情况, 采用 1500 W 的 2.1 MHz 进行射频辅助辉光放电清洗, 可以获得最低的击穿气压。

然而, 本次实验中所有工况的功率耦合效率都不高, 最大耦合效率 < 50%, 这么高的功率损耗不适合实际应用, 有必要提高实验的功率耦合效率。并且, 增加耦合功率还有可能获得更低的击穿气压, 这对于泵组运行以及放电控制都非常有益。因此, 如何提高功率耦合效率是射频辉光放电实验需要关注的重点, 而阻抗匹配是解决这个问题的关键。由于负载(HL-2M 真空室)的结构、电极的结构、位置等均会对负载阻抗产生影响, 而本次实验中三套射频电源均采用标准匹配网络进行阻抗匹配, 无法满足 HL-2M 装置的特殊工况。在后续的实验中需要对射频电极结构、位置等对阻抗的影响进行研究, 并针对 HL-2M 装置设计合理的阻抗匹配网络, 以获得更好的实验效果。

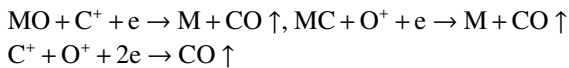
2.2 射频频率对清除效率的影响

HL-2M 初始放电阶段真空室的面向等离子体材料主要为 Inconel 625(真空室壁和临时第一壁), 主要杂质为表面的碳氢沉积层以及金属氧化物层^[15]。氢气辉光放电产生的原子氢与碳发生氢化反应、与氧发生还原反应生成易发散的产物:



当入射粒子所携带的能量满足这些表面反应所需的激活能和释放所需克服的表面束缚能时, 相应产物便可以从受激表面释放出来。

另外, 高能入射氢离子轰击碳氢沉积层时, 能量转移给 C、O 原子, 从而形成 CO:



因此, 氢气辉光放电清洗主要的反应产物为 CH_4 ($M/q=16$)、 H_2O ($M/q=18$) 和 CO ($M/q=28$)。为了对比不同驱动频率对杂质的清除效率, 分别采用不同驱动频率使气体击穿, 然后叠加相同的直流电流

($I=5\text{A}$) 后维持稳定放电, 由差分质谱系统对放电过程中的残余气体成分进行实时监测, 对比不同驱动频率下 CH_4 、 H_2O 和 CO 的离子流随时间的变化情况, 结果如图 4 所示, 其中射频设定功率均为 1500 W。

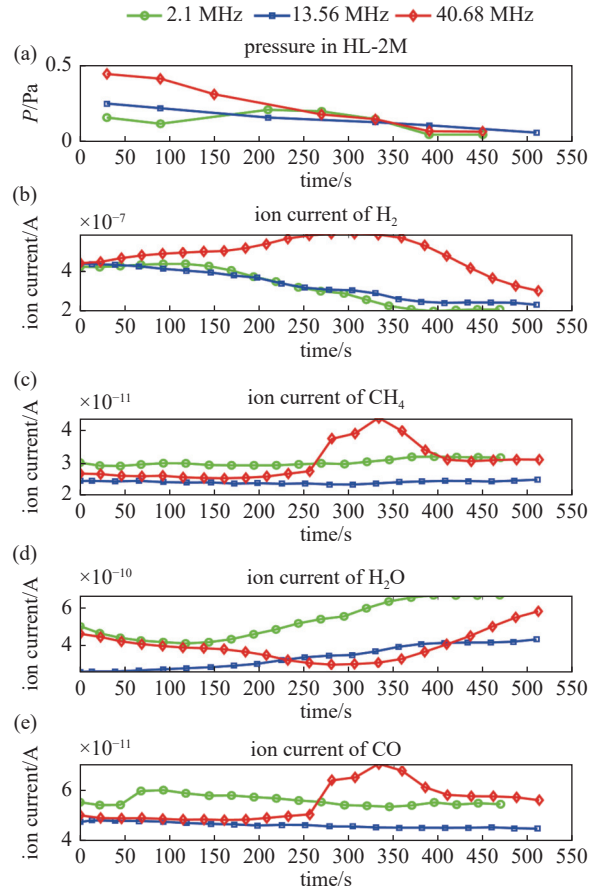


图4 不同频率的杂质峰值曲线:(a) 真空室压强;(b) 质谱峰 2(H_2) 离子流;(c) 质谱峰 16(CH_4) 离子流;(d) 质谱峰 18(H_2O) 离子流;(e) 质谱峰 28(CO) 离子流

Fig. 4 Ion current of mass at different radio-frequency: (a) pressure in the vacuum vessel, (b) ion current of Mass 2(H_2), (c) ion current of Mass 16(CH_4), (d) ion current of Mass 18(H_2O), (e) ion current of Mass 28(CO)

图中 40.68 MHz 放电过程中出现了 CH_4 和 CO 离子流的突然增加, 可能是辉光打到某个死空间的碳氢杂质层产生的出气, 这部分数据不用做实验结果的讨论。

2.1 MHz 和 13.56 MHz 放电的工作压强基本维持在 $1\sim 2\times 10^{-1}$ Pa 左右, 受到射频耦合功率波动的影响, 工作气压有所波动。如图所示, 实验过程中两者的 H_2 离子流相当, 此时 2.1 MHz 放电的各成分产额均高于 13.56 MHz。其中, CH_4 高了约 25%, H_2O 高了约 59%, CO 高了约 21%。

由于 40.68 MHz 放电的击穿气压较高, 在实验过程中将气体压强逐渐降低至 $\sim 1 \times 10^{-1}$ Pa。如图所示, 40.68 MHz 放电的 H_2O 离子流明显高于 13.56 MHz, 略低于 2.1 MHz; 而 CH_4 和 CO 离子流略高于 13.56 MHz, 明显低于 2.1 MHz。

通常影响放电清除效率的主要因素有氢原子通量密度、电子温度、电离系数、器壁温度和高能粒子数等^[1], 主要为 (1) 表面反应发生率取决于入射到壁面的低能氢粒子数, 所以清除效率正比于氢原子的通量密度; (2) 为了使形成产物不会在等离子体中再次电离、解析、再沉积到器壁表面, 等离子体的电子温度和电离系数不能太高; (3) 高壁温不仅可以增加生成产物的反应率, 也能增加产物的解吸附率。(4) 高能离子与表面的碰撞反应会对解吸附起到一定作用。

根据文献 [7] 的研究结果, 高频放电感应的电磁场较强, 单个电子获得的能量多, 电离率高, 电子密度和离子密度高; 而低频放电单个电子获得的能量少, 但趋肤深度较厚, 加热的电子数量多, 电子温度高。那么, 对于高频放电, 高的离子密度使得其氢粒子通量高, 反应产额增加; 但其等离子体中的高电子能量高和高电离率, 又会使得反应产物再沉积从而减少反应产额。而对于低频放电, 较多的受热电子数量在射频场中往复运动会对壁面加热, 使得壁温升高, 从而解吸出更多的反应产物。

对于脱附能较高的 CH_4 、CO, 壁面温度可能对它们的脱附起重要作用, 所以低频 2.1 MHz 放电的高壁温可能是使其清除效率高于另外两个频率放电的主要原因^[1]。而对于脱附能较低的 H_2O , 甚高频 40.68 MHz 放电的高等离子体密度能增加其反应产额, 获得与 2.1 MHz 放电相当的产额。

2.1 MHz 和 13.56 MHz 放电过程, H_2 离子流随时间增加而减少, 对应的 H_2O 离子流增加, 但 CH_4 、CO 的离子流基本不变。可见随着放电时间增加, 壁温升高, 更多的氢原子参与表面反应生成 H_2O 并脱附。

结果表明, 在 HL-2M 装置初始放电阶段, 2.1 MHz 的射频直流辉光放电具有最高的清洗效率。然而, 由于本次实验中 13.56 MHz 和 40.68 MHz 的耦合功率小于 2.1 MHz, 一定程度上影响了这两种频率放电的清洗效率。如表 1 所示, 40.68 MHz 放电的耦合功率只有不到 13.56 MHz 放电的一半, 但

其各成分产额仍高于 13.56 MHz。表 2 为工作压强约为 0.2 Pa, 将射频耦合功率归一化为 1 kW 后的各驱动频率的等效杂质清除效率。可以看到, 当工作压强相当、耦合功率相等时, 40.68 MHz 放电的杂质清除效率最高。所以如果能增加 40.68 MHz 的耦合功率, 可以预见其清除效率会明显增加。

表 2 不同频率的等效杂质清除效率

驱动频率/ MHz	CH_4 清除率/ (molecules.s ⁻¹)	H_2O 清除率/ (molecules.s ⁻¹)	CO 清除率/ (molecules.s ⁻¹)
2.1	3.78×10^{16}	6.10×10^{17}	6.35×10^{16}
13.56	1.45×10^{16}	1.57×10^{17}	2.47×10^{16}
40.68	4.64×10^{16}	6.84×10^{17}	7.51×10^{16}

3 总结

在 HL-2M 装置初始运行阶段采用不同驱动频率的射频电源开展了初步的射频辅助辉光放电清洗实验研究。结果表明, 得益于低频放电中离子与电子的共同运动, 提供了更多用于碰撞电离的粒子数, 2.1 MHz 具有最低的击穿气压。另外, 2.1 MHz 放电清洗效率最高, 推测可能是其壁面温度较高, 更利于表面反应产物的解吸。40.68 MHz 放电清洗效率比 13.56 MHz 高, 意味着高的等离子体密度增加了表面反应率。

实验还发现, 虽然 40.68 MHz 放电的功率耦合效率低, 但仍获得了高于 13.56 MHz 的清洗效率。因此如果能提高 40.68 MHz 放电的耦合功率, 预计可以获得更高的清洗效率。在相同的耦合功率下, 2.1 MHz 和 40.68 MHz 哪种频率具有更好的清洗特性仍需要进一步研究。

此外, 阻抗问题是开展射频辅助辉光放电首先要解决的关键问题, 只有提高等离子体的功率耦合效率, 才能获得更好的清洗效果。在后续研究中, 将对射频电极的结构、位置等进行调节和研究, 并设计合理的匹配网络以解决该问题。

参 考 文 献

- [1] Zhu Yukun. Vacuum Science and Technology in Nuclear Engineering[M]. 1st ed, Beijing, China: Atomic energy Press, 2010: 170-177. (朱毓坤. 核真空科学技术[M]. 1版. 北京: 原子能出版社, 2010: 160-177(in chinese))
- [2] Philipps V. Wall conditioning on TEXTOR[J]. Fusion Science and Technology, 2005, 47(2): 119-125

- [3] Jackson G L, Taylor T S, Taylor P L, et al. Particle control in DIII-D with helium glow discharge conditioning [J]. *Nuclear Fusion*, 1990, 30(11): 2305–2317
- [4] Herschbach K, Maurer W, Vetter J E. The JET glow discharge cleaning system[J]. *Fusion Technology*, 1994: 203–206
- [5] Kim K M, Yang H L, Hong S H, et al. Wall conditioning of the KSTAR vacuum vessel[J]. *Fusion Engineering & Design*, 2009, 84(2-6): 1026–1028
- [6] Cai Xiao, Cao Zeng, Huang Xiangmei, et al. RF-assisted glow discharge cleaning of HL-2A[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2014, 34(6): 645–649 (蔡潇, 曹曾, 黄向玫, 等. 射频辅助的直流辉光放电清洗在HL-2A装置上的应用[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(6): 645–649(in chinese))
- [7] Zhang Gailing, Hua Yue, Hao Zeyu, et al. Experimental investigation of plasma parameters in 13.56 MHz/2 MHz cylindrical inductively coupled plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 186–195 (张改玲, 滑跃, 郝泽宇, 等. 13.56 MHz/2 MHz柱状感性耦合等离子体参数的对比研究[J]. *物理学报*, 2019, 68(10): 186–195(in chinese))
- [8] Brooks N H, Petersen P. Initial conditioning of the vessel wall and the graphite limiters in DIII-D[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1987, 145: 770–774
- [9] Dietz K J, Bartlett D, Baumel G, et al. Start up and initial operation of JET[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1984, 128-129: 10–18
- [10] Cao Chengzhi, Cao Zeng, Cui Chenghe et al. Development of the DC glow discharge cleaning system electrodes for the first plasma discharge of HL-2M[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2021, 41(S1): 366–370 (曹诚志, 曹曾, 崔成和, 等. HL-2M装置初始等离子体放电阶段的直流辉光放电清洗系统研制[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2021, 41(S1): 366–370(in chinese))
- [11] Ran Hong, Cao Zeng, Tang Le, et al. Design of HL-2M Vacuum vessel[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2021, 41(S1): 327–331 (冉红, 曹曾, 唐乐, 等. HL-2M装置真空室设计[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2021, 41(S1): 327–331(in chinese))
- [12] Zhou Jun, Cao Zeng, Cao Chengzhi, et al. Preliminary results of mass spectrometry measurements on HL-2M tokamak[J]. *Vacuum*, 2022, 59(3): 68–73 (周军, 曹曾, 曹诚志, 等. HL-2M装置质谱测量的初步结果[J]. *真空*, 2022, 59(3): 68–73(in chinese))
- [13] Chabert P, Braithwaite N. Physics of Radio-Frequency Plasmas[M]. Wang Younian, Xu Jun, Song Hongyuan, translated. Beijing, China: Science Press, 2015:13 (夏波特 P, 布雷思韦特 N. 射频等离子体物理学[M]. 王友年, 徐军, 宋远红, 译. 北京: 科学出版社, 2015: 13(in chinese))
- [14] Di Xiaolian, Xi Yu, Ning Zhaoyuan, et al. Effect of antenna configuration on power transfer efficiency for planar inductively coupled plasmas[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(10): 5311–5317 (狄小莲, 辛煜, 宁兆元. 平板型感应耦合等离子体源的线圈配置对功率耦合效率的影响[J]. *物理学报*, 2006, 55(10): 5311–5317(in chinese))
- [15] Winter J. Wall conditioning in fusion devices and its influence on plasma performance[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1999, 38(9): 1503