

氢等离子体特性及其对钨的辐照行为研究

陈 波¹, 王宏彬², 韦建军³, 陈建军¹

- (1. 四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064;
2. 上海宏澎能源科技有限公司, 上海 201203;
3. 四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610064)

摘 要: 本文依托四川大学直线等离子体装置(SCU-PSI)产生高通量氢等离子体,采用朗缪尔探针对氢等离子体特性进行诊断,研究了氢等离子体特性随放电电流、气体流量等输入条件的演变规律;并利用调控产生的氢等离子体对纯钨进行了相应的辐照研究. 实验结果显示,在磁场 0.1~0.2 T、气流量 1 000~2 200 sccm 和电流 180~228 A 范围内,氢等离子体通量密度、热负荷密度及电子密度、温度等参数与磁场和电流呈正相关关系,而与气体流量呈负相关关系. 在该范围内,最高等离子体密度达到 $2.6\times10^{19}\text{ m}^{-3}$, 等离子体通量达到 $8.8\times10^{22}\text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 热负荷达到 $6.5\times10^4\text{ W/m}^2$. 利用调控产生的等离子体对纯钨样品进行初步辐照实验,结果显示随着入射等离子体特性的不同,样品表面出现不同程度的尺寸和密度不均匀颗粒状辐照损伤结构,并且颗粒尺寸随氢等离子体离子通量的增加而增大. 本文结果显示 SCU-PSI 可以产生理想的氢等离子体环境,因此可以作为未来聚变领域,研究氢等离子体和托卡马克装置面向等离子体材料钨以及相应结构材料相互作用的有效实验装置.

关键词: 氢等离子体; 钨; 等离子体特性; 辐照; 朗缪尔探针

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.054001

Study on the characteristics of hydrogen plasma and its irradiation behavior to tungsten

CHEN Bo¹, WANG Hong-Bin², WEI Jian-Jun³, CHEN Jian-Jun¹

- (1. Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
2. Hope Innovation (Shanghai) Incorporated, Shanghai 201203, China;
3. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The developmental rules of hydrogen plasma properties with the changes of discharging current, magnetic field and gas flow were studied using the facility of Sichuan University Plasma Surface Investigation (SCU-PSI). The performance of regulated plasma was characterized by Langmuir double probes and the irradiation of pure tungsten under above plasma environment was researched. The experimental results show that, in the range of magnetic field 0.1~0.2 T, gas flow 1 000~2 200 sccm and discharging current 180~228 A, the electron temperature and density are positively correlated with magnetic field and current and discharging current, and negatively correlated with gas flow. And the greatest electron density, the flux density and the heat load obtained are $2.6\times10^{19}\text{ m}^{-3}$, $8.8\times10^{22}\text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,

收稿日期: 2021-03-03

基金项目: 四川大学专职博士后研发基金(2019SCU12072); 四川大学科研项目(HG2020144, HG2020175)

作者简介: 陈波(1983—), 男, 四川成都人, 本科, 主要研究领域为等离子体物理及应用.

通讯作者: 陈建军. E-mail: sc_qs@126.com

$6.5\times10^4\text{ W/m}^2$, respectively. In the irradiation experiment of pure tungsten using above achieved hydrogen plasma environment, the particle was found due to the irradiation damage and the scale of particles increased with the increase of plasma flux. Therefore, from this paper, it reveals that the SCU-PSI could produce satisfied plasma environment and could be used as the effective facility to study the interaction between hydrogen plasma and plasma facing materials, like tungsten, in Tokamak device of the field of nuclear fusion.

Keywords: Hydrogen plasma; Tungsten; Plasma performance; Irradiation; Langmuir probes

1 引言

托卡马克装置中高通量等离子体与第一壁和偏滤器有着强烈的相互作用,其中偏滤器需同时承受高通量和高热负荷氢等离子体辐照^[1-7]. 为研制出满足相关参数要求的面向等离子体材料以建设未来商用聚变堆装置,我们需模拟产生相应的高密度等离子体环境,并对候选材料进行考评筛选. 直线装置是实现这一等离子体环境模拟考评的有效手段. 目前,许多国家已相继搭建了不同的直线等离子体装置对这一问题进行研究^[8-10]. 四川大学先进核能实验室基于直线等离子体装置(SCU-PSI),自行研制了大功率三阴极等离子体源,可模拟聚变堆中等离子体服役环境,并可以满足第一壁材料和偏滤器材料在不同等离子体环境下的辐照实验研究.

钨具有高熔点、高热导率以及低溅射率等优点,是目前托卡马克装置中主流的面向等离子体的固体结构材料^[11-13]. 然而研究发现,长时间高通量氢等离子体辐照,会造成钨材料脆化、鼓包、开裂等问题^[12-15],将严重降低钨作为固态第一壁及偏滤器部件材料的使用寿命^[16-18]. 因此,在建设商用聚变堆前,对钨材料进行氢等离子体的辐照考核和综合评估是必不可少的. 本文依托四川大学 SCU-PSI 装置开展研究实验,产生参数范围宽、可调可控、稳态的高密度氢等离子体,并采用朗缪尔双探针针对获得的氢等离子体特性进行诊断,研究氢等离子体特性随放电电流、气体流量等输入条件的演变规律. 此外,利用不同特性的氢等离子体对纯钨样品进行了初步的辐照研究,讨论了其表面形貌特征的变化规律. 本文相关研究结果为氢等离子体与面向等离子体材料相互作用提供参考,加快面向等离子体材料的辐照考评研究进程.

2 实验装置

本文采用的是本团队先前报道^[19]的四川大学

直线等离子体装置(SCU-PSI),其结构示意图如图 1 所示. 该装置主要由三阴极等离子体源、磁场系统、进气系统、等离子体诊断系统和真空腔室等组成,其中等离子体源部件采用的具体结构如先前报道^[19]所示. 产生的高通量氢等离子体,可以利用自制的朗缪尔双探针对其相关特性进行诊断,具体如先前报道^[20]所示.

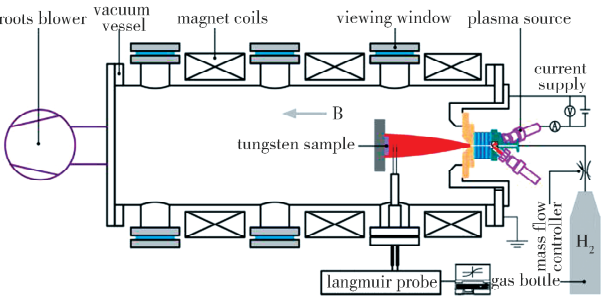


图 1 直线等离子体装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of linear plasma device

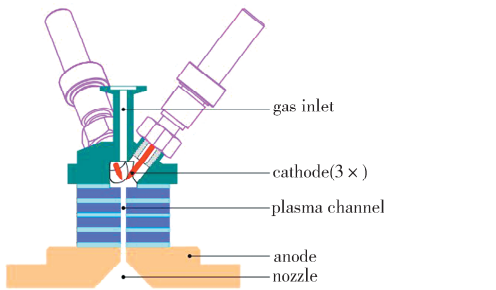


图 2 三阴极级联弧等离子体源示意图
Fig. 2 Schematic diagram of three-cathode cascade arc plasma source

3 实验方法

通过调节放电电流、气体流量和磁场强度等输入条件,采用朗缪尔双探针针对氢等离子体特性进行诊断,获得了不同参数下氢等离子体特性随输入条件的演变规律,为辐照钨样品积累了基础数据. 辐照钨样品时保持放电电流、辐照时间和气体流量参数固定不变. 分别将 3 组样品固定至 SCU-PSI 装置中心轴线相同位置进行辐照. 辐照实验后,继续

维持 SCU-PSI 装置真空状态,待样品自然冷却后取出,防止其表面氧化. 本文采用原子力显微镜(XE7, Park Systems),对辐照前后钨样品表面中心 $5\text{ }\mu\text{m}\times5\text{ }\mu\text{m}$ 的区域进行扫描,研究样品表面的形貌特征变化规律.

4 实验结果与讨论

4.1 氢等离子体电子密度、温度与放电电流及气体流量的关系

图 3(a)和 3(b)分别为氢等离子体电子密度、

温度与放电电流及气体流量的关系图. 结果显示,在 1 000 sccm 流量和 0.2 T 稳恒磁场下,当输入电流为 180 A 时,所产生的稳态氢等离子体经由朗缪尔探针测试,其电子密度和电子温度分别为 $9.7\times10^{18}\text{ m}^{-3}$ 和 0.46 eV;随着进一步的提高放电电流,电子密度和电子温度均呈现近乎直线地上升,在此区间内展现明显的正相关特性,当放电电流达到 210 A 时,其电子密度和电子温度分别达到了 $1.84\times10^{19}\text{ m}^{-3}$ 和 0.64 eV,比 180 A 条件下的结果分别提升了 0.9 倍和 0.4 倍.

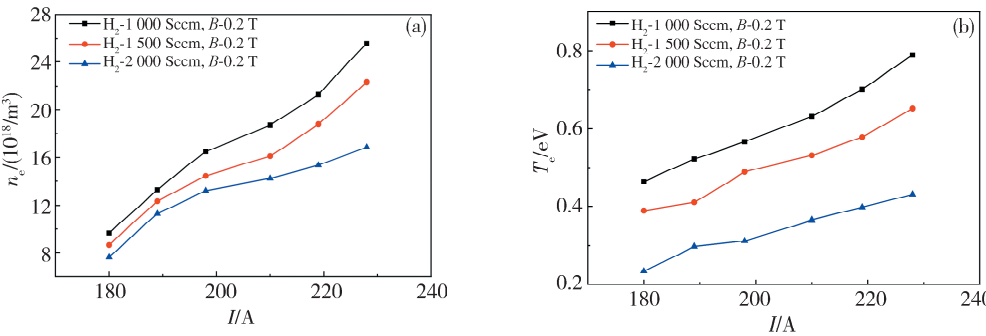


图 3 不同气体流量条件下氢等离子体的电子密度、电子温度与放电电流的关系
Fig. 3 Relationships between electron density, electron temperature and discharge current of hydrogen plasma at different hydrogen flow rates

通过分析可知,等离子体电子密度、温度与放电电流的关系满足以下公式. 等离子体源所加电场近似为匀强电场,电场强度为:

$$E=\frac{U}{L}$$
 (1)

式中, U 实测电压, L 等离子体源放电通道长度. 平均电流密度 j :

$$j=\frac{I}{\pi r^2}$$
 (2)

平均电阻率 η :

$$\eta=\frac{E}{j}=\frac{U\pi r^2}{LI}$$
 (3)

式中, I 等离子体源放电电流, r 等离子体源放电通道半径. 因此, σ 平均电导率:

$$\sigma=\frac{1}{\eta}=\frac{1}{E/j}=\frac{LI}{U\pi r^2}$$
 (4)

由公式(4)所示,提升电流可以线性提升等离子体的电导率,并且随着放电电流的增加,可以注入更多的能量进入等离子体,增大等离子体束流中的平均加速电场,此时增加的电导率可以进一步增强放电电源与等离子体之间能量转换效率^[21-24]. 因此,随着放电电流的增大,等离子体温度和等离子体密度都产生了类线性的增加. 如图 3 所示,相关特性

与本实验结果较为相符.

然而放电等离子体的特性还受很多其他因素影响,其中通气流量就是很重要的一个变量. 如图 3(a)和 3(b)所示,随着气流量从 1 000~2 000 sccm 的逐步提升,相应的等离子体温度和等离子体密度都明显降低. 由于通气量增加,空间中性粒子浓度线性增加引起粒子之间碰撞增加,导致电子温度均呈现线性递减. 而对于电子密度而言,由于气流量增大会导致体系电阻明显增大,等离子体源与束流的能量转换效率降低,导致电子密度也发生相应的降低. 当输入电流为 230 A 时,随着输入气体流量增大,电子密度的退化效应反而更显著,如图 3(a)所示. 这可能是由于氢分子及原子的半径尺度较小,粒子密度增加后导致的碰撞离化效率降低引起的.

4.2 氢等离子体电子密度、温度与气体流量及磁场强度的关系

图 4(a)和 4(b)分别为氢等离子体电子密度、温度与气体流量以及磁场的变化关系. 结果显示,在输入电流为 228 A,磁场为 0.2 T 参数下,当输入气流量为 1 200 sccm 时,等离子体密度达到 $2.05\times10^{19}\text{ m}^{-3}$,电子温度达到 0.71 eV. 随着气流

量提升,电子温度产生线性衰减. 如图 4(b)所示,在 2 200 sccm 流量下,电子温度降低到了 0.4 eV,衰减了 44%. 而电子密度则随气体流量的增大呈现先急剧降低再缓慢降低的趋势. 在 2 200 sccm 流量下电子密度降低为 $4.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,衰减了 79%. 而当降低腔室中的轴向磁场时,等离子体的电子温度和电子密度均发生显著降低. 其中电子密度在 1 200 sccm 流量时下降最为明显,0.1 T 下电子密度只有 $2.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$. 这主要是因为气体流量增加,电阻率增大(电导率减小),导致能量转换率降低. 而输入的电流不变,等离子体源钨针尖端产生的电子数减少,与氢气发生碰撞电离的几率减小,从而使等离子体电子密度、温度减小^[25-27]. 气体流量、放电电流恒定时,氢等离子体电子密度、温度随磁场强度增加而增大.

因等离子体中带电粒子与基团在磁场中受洛伦兹力作用,并做拉莫尔运动,拉莫尔半径为:

$$r=\frac{mv}{qB}$$

(5)

式中, m 带电粒子质量, q 带电粒子电荷量, B 磁场强度. 磁场强度增加,拉莫尔半径减小. 带电粒子受磁场约束作用,向磁场中心轴线靠拢,单位面积通过的等离子体通量增大,等离子体电子密度随着磁场强度的增加而增大. 然而,随着拉莫尔半径减小,带电粒子被约束在更小的空间内,此时系统总能量未发生变化,被约束粒子碰撞截面减小,等离子体中的高能粒子与背景粒子和中性粒子间的碰撞几率降低,等离子体的能量得以保留. 因此,在此范围内,等离子体的电子温度随着磁场强度的增加而增大^[21]. 然而如图 4,在 2 200 sccm 流量下,不同的磁场导致的磁场差异不明显,这是因为在系统总能量不变的情况下,随着磁场的提升,等离子体温度发生了一定的提升,进而导致等离子体密度增长趋势放缓.

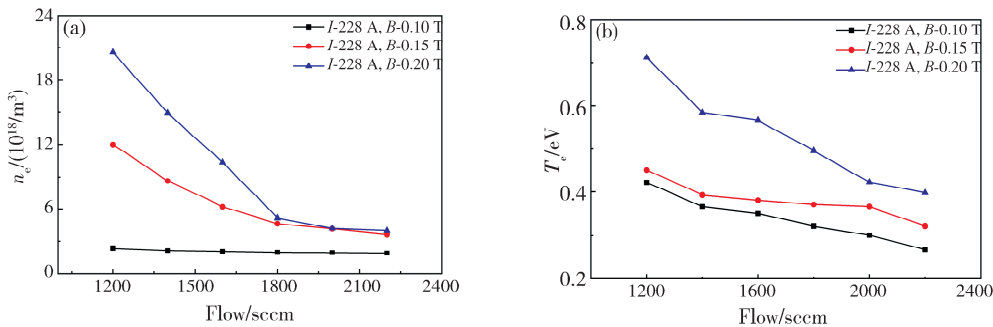


图 4 不同磁场强度下氢等离子体的电子密度、电子温度与气体流量的关系

Fig. 4 The relationships between electron density, electron temperature and gas flow rate of hydrogen plasma under different magnetic field intensity

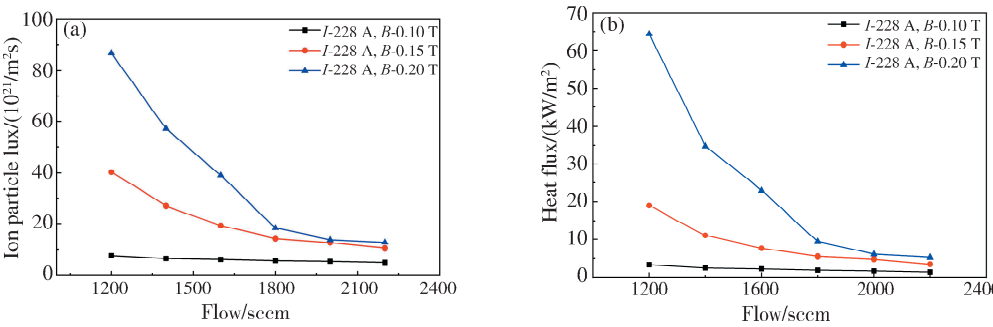


图 5 不同磁场强度下氢等离子体通量、热负荷与气体流量的关系

Fig. 5 Relationships between ion flux, heat load and hydrogen flow rate of hydrogen plasma under different magnetic field intensities

4.3 氢等离子体通量、热负荷与气体流量及磁场强度的关系

在托卡马克装置中,等离子体的群体效应即等离子体通量和热负荷对壁材料以及偏滤器材料的性能影响起到重要作用. 因此有必要对产生的氢

等离子体的等离子体通量和热负荷进行分析. 等离子体通量与电子密度、温度,以及气体的相对分子质量密切相关,且满足公式:

$$\Gamma_i=n_e c_s \cong 0.5 \cdot 10^4 \cdot n_e \frac{\sqrt{2 T_e}}{\sqrt{A_i}}$$

(6)

式中, Γ_i 等离子体通量, c_s 等离子体声速, n_e 等离子体电子密度, T_e 等离子体电子温度, A_i 气体质量数. 等离子体热负荷满足公式:

$$q=ik\,T_e\zeta$$

(7)

式中, k 为玻尔兹曼常数($1.38\times10^{-23}\text{J/K}$), ζ 为鞘层热传递系数(一般在 6~7 之间, 本文取 6.5), i 为等离子体通量, T_e 为电子温度^[20].

图 5(a) 和 5(b) 分别为计算后的氢等离子体通量、热负荷与气体流量以及磁场的关系图. 由式 (6) 和式 (7) 可知, 等离子体通量和热负荷与等离子体的电子温度和电子密度具有重要关系. 从图 3 和图 4 可以发现, 在实验范围内电子温度与气流量基本呈现线性变化趋势, 而电子密度则随气流量增大呈现先急剧降低再缓慢降低的类指数性衰减趋势. 因此, 对于等离子体通量以及等离子体热负荷随气流量的变化趋势与图 4(a) 的趋势基本一致. 当磁场强度和放电电流恒定时, 氢等离子体通量和热负荷随气体流量增加而减小; 当气体流量和

放电电流恒定时, 氢等离子体通量和热负荷随磁场强度增加而增大. 在本实验参数范围内, 在 1 200 sccm 气流量、228 A 放电电流和 0.2 T 的稳恒磁场环境下, 我们获得了最大的等离子体通量和热负荷, 分别为 $8.8\times10^{22}\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $6.5\times10^4\text{W/m}^2$. 上述结果表明本装置可以稳定调控产生理想的氢等离子体参数, 后续将会在本装置上进行氢等离子体环境下的托克马克壁材料的辐照实验.

4.4 氢等离子体辐照对钨样品表面形貌的影响

为了对托克马克装置壁以及偏滤器材料进行辐照考核, 本文利用 SCU-PSI 产生的氢等离子体环境对纯钨进行了辐照研究. 通过进一步优化等离子体参数, 调节气体流量和放电电流, 在不同磁场(0, 0.1, 0.15 和 0.3 T)调节下, 利用获得的等离子体通量($0, 0.82\times10^{23}, 1.82\times10^{23}$ 和 $3.3\times10^{23}\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)对打磨后的纯钨样品($10\text{ mm}\times10\text{ mm}\times2\text{ mm}$)进行 30 min 的长时间稳态辐照, 辐照后对样品进行表面的 AFM 测试, 结果如图 6 所示.

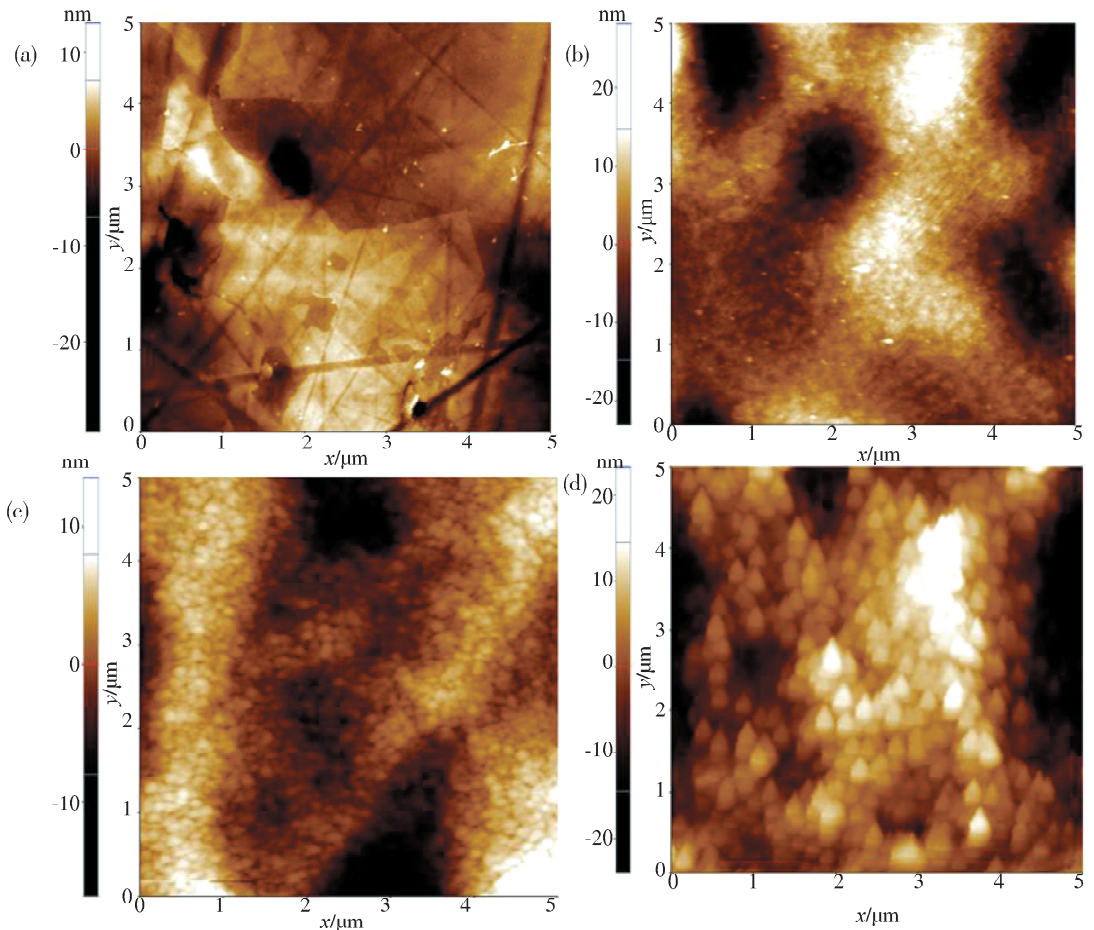


图 6 不同磁场强度下氢等离子体辐照钨样品的表面形貌特征: (a) 0 T, (b) 0.1 T, (c) 0.15 T, (d) 0.2 T
Fig. 6 Surface morphology of hydrogen plasma irradiated tungsten samples under different magnetic field intensities; (a) 0 T, (b) 0.1 T, (c) 0.15 T, (d) 0.2 T

对于辐照参数为 0 T, 如图 6(a) 所示, 表面仅有打磨时残留的划痕, 整体较为平整和光滑, 表面粗糙度仅为 3.6 nm. 引入氢等离子体辐照后, 表面划痕几近消失, 出现了非常细小的微粒, 并且相邻区域产生了较大的起伏, 表面粗糙度上升到了 7.5 nm. 随着磁场强度不断增加, 等离子体通量逐渐增大, 微小颗粒逐渐长大并趋于晶粒化, 表面粗糙度也分别增长到 10.2 和 15.6 nm. 如图 6(d) 所示, 表面产生了明显的百纳米级的不规则颗粒物. 这是显著的氢等离子体辐照致使的损伤, 这些颗粒的产生可能是氢在钨中形成的团簇造成的. 钨中滞留的氢会优先被空穴、缺陷或晶界等缺陷捕获, 聚集的氢元素逐渐形成尺寸和密度不均的团簇^[28-30], 而这些分布不均匀的团簇通过挤压造成钨表面形成如图 6 的损伤形貌.

通过上述辐照实验可以发现, 四川大学先进核能实验室基于直线等离子体装置(SCU-PSI)产生的氢等离子体环境参数高, 并且对壁材料钨可以产生明显的辐照损伤, 具备模拟托卡马克装置中等离子体与第一壁材料和偏滤器材料相互作用的功能.

5 结 论

本文通过四川大学先进核能实验室基于直线等离子体装置(SCU-PSI), 研究了中氢等离子体特性随输入条件(放电电流、气体流量、磁场强度)的演变规律, 可以对氢等离子体环境进行理想化的调控. 此外, 我们利用不同特性的氢等离子体辐照钨样品, 结合原子力显微镜对辐照前后样品表面形貌进行了特征分析. 结果表明, 随着氢等离子体通量的增加, 钨的辐照损伤逐渐增强. 本文结果表明, 本装置可以实现托卡马克壁材料氢等离子体辐照环境的有效模拟, 加速聚变领域的材料发展.

参考文献:

- [1] Ma X C, Cao X G, Han L, *et al.* Characterization of high flux magnetized helium plasma in SCU-PSI linear device [J]. *Plasma Sci Technol*, 2018, 20: 025104.
- [2] 马小春, 曹小岗, 曹智, 等. 级联弧放电氦等离子体特性研究[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2017, 37: 267.
- [3] Cao X G, Xia Y X, Chen B Z, *et al.* Langmuir probe measurements of an expanding argon plasma [J]. *Plasma Sci Technol*, 2015, 17: 20.
- [4] 张志艳, 曹小岗, 韩磊, 等. 三阴极级联弧源下氦等
- 离子体的特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37: 1102.
- [5] Han L, Gou F J, Cao X G, *et al.* Enhanced erosion of lithium surface with capillary porous system [J]. *Fusion Eng Des*, 2017, 121: 308.
- [6] Carpentier S, Pitts R A, Stangeby P C, *et al.* Modelling of beryllium erosion-redeposition on ITER first wall panels [J]. *J Nucl Mater*, 2011, 415: S165.
- [7] De Temmerman G, Morgan T W, van Eden G G, *et al.* Effect of high-flux H/He plasma exposure on tungsten damage due to transient heat loads [J]. *J Nucl Mater*, 2015, 463: 198.
- [8] De Temmerman G, van den Berg M A, Scholten J, *et al.* High heat flux capabilities of the Magnum-PSI linear plasma device [J]. *Fusion Eng Des*, 2013, 88: 483.
- [9] van Eck H J N, Abrams T, van den Berg M A, *et al.* Operational characteristics of the high flux plasma generator Magnum-PSI [J]. *Fusion Eng Des*, 2014, 89: 2150.
- [10] van den Pol M J, Alonso van den Westen S, Aussems D U B, *et al.* Operational characteristics of the superconducting high flux plasma generator Magnum-PSI [J]. *Fusion Eng Des*, 2018, 136: 597.
- [11] Bernard E, Sakamoto R, Kreter A, *et al.* Tungsten as a plasma-facing material in fusion devices: impact of helium high-temperature irradiation on hydrogen retention and damages in the material [J]. *Phys Scr*, 2017, 2017: 014023.
- [12] Heinola K, Likonen J, Ahlgren T, *et al.* Long-term fuel retention and release in JET ITER-Like Wall at ITER-relevant baking temperatures [J]. *Nucl Fusion*, 2017, 57: 086024.
- [13] Hao B, White R, Gao X, *et al.* Modeling of the beam excited fishbone mode in EAST [J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 076040.
- [14] Buzi L, De Temmerman G, Unterberg B, *et al.* Influence of tungsten microstructure and ion flux on deuterium plasma-induced surface modifications and deuterium retention [J]. *J Nucl Mater*, 2015, 463: 320.
- [15] Jia Y Z, Liu W, Xu B, *et al.* Mechanism for orientation dependence of blisters on W surface exposed to D plasma at low temperature [J]. *J Nucl Mater*, 2016, 477: 165.
- [16] Shu W M, Luo G N, Yamanishi T. Mechanisms of

retention and blistering in near-surface region of tungsten exposed to high flux deuterium plasmas of tens of eV [J]. J Nucl Mater, 2007, 367: 1463.

[17] Shu W M, Wakai E, Yamanishi T. Blister bursting and deuterium bursting release from tungsten exposed to high fluences of high flux and low energy deuterium plasma [J]. Nucl Fusion, 2007, 47: 201.

[18] Meinander K, Järvi T T, Nordlund K. Contact epitaxy in multiple cluster deposition [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89: 253109.

[19] 郭恒鑫, 叶宗标, 王博, 等. 高通量氢等离子体对 CX-2002U 碳复合材料的化学侵蚀研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 1152.

[20] 李敏, 杨黎, 陈建军, 陈波, 等. 金属铌表面 Ar/O₂ 等离子体在线清洗的实验研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 1147.

[21] 张卫卫, 薛晓艳, 左浩毅, 等. 低温高密度等离子体轰击下锂蒸发器机理研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35: 752.

[22] Janssen G M, van Dijk J, Benoy D A, *et al.* PLASIMO, a general model: I. applied to an argon cascaded arc plasma [J]. Plasma Sources Sci Technol, 1999, 8: 1.

[23] Piotrowicz P A, Caneses J F, Green D L, *et al.* Helicon normal modes in Proto-MPEX [J]. Plasma Sources Sci Technol, 2018, 27: 055016.

[24] Rapp J, Beers C, Biewer T, *et al.* Operational domain of Proto-MPEX [J]. Fusion Eng Des, 2018, 136: 712.

[25] Westerhout J. Carbon chemical erosion in high flux and low temperature hydrogen plasma [D]. Eindhoven Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2010.

[26] Ning R H, Li Y G, Zhou W H, *et al.* Modeling D retention in W under D ions and neutrons irradiation [J]. J Nucl Mater, 2012, 430: 20.

[27] Davis J W, Slattery K T, Driemeyer D E, *et al.* Use of tungsten coating on iter plasma facing components [J]. J Nucl Mater, 1996, 233: 604.

[28] 郭龙婷, 孙继忠, 黄艳, 等. 低能氢粒子沿不同角度轰击钨(001)表面的反射概率及入射深度分布的分子动力学研究[J]. 物理学报, 2013(22): 401.

[29] 张文钊, 唐兴华, 李嘉庆, 等. 氘在碳钨共沉积层中的滞留行为研究 [J]. 物理学报, 2013, 62: 195202.

[30] 郑淇蓉, 刘俊, 李鹏迪, 等. 中子预辐照损伤对钨中氢滞留行为影响机制的多尺度模拟[J]. 原子与分子物理学报, 2021, 38: 033001.

引用本文格式:

中 文: 陈波, 王宏彬, 韦建军, 等. 氢等离子体特性及其对钨的辐照行为研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 054001.

英 文: Chen B, Wang H B, Wei J J, *et al.* Study on the characteristics of hydrogen plasma and its irradiation behavior to tungsten [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 054001.