

HT-7 等离子体辐照后金属第一镜表面特性研究

李仁红, 汤春江, 陈俊凌, 种法力

(中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

[摘要] 主要研究多晶钨、钼、不锈钢等金属第一镜在 HT-7 超导托卡马克等离子体辐照后的表面特性变化。金属第一镜直接安装在装置内部第一壁的不同位置, 试验后通过对镜面反射率和第一镜表面形貌、成分的测量, 研究不同材料第一镜的表面特性变化。通过对试验结果的分析, 发现三种材料的第一镜漫反射率变化都较大, 钨材料第一镜的镜面反射率变化是三者中最小的, 样品周围加热系统决定了附近第一镜的表面特性变化趋势。

[关键词] 第一镜; 反射率; 溅射; 沉积; 表面形貌

[中图分类号] TG172.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2007)04-0011-04

Investigation of First Mirror Irradiated in HT-7

LI Ren-hong, TANG Chun-jiang, CHEN Jun-ling, ZHONG Fa-li

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

[Abstract] The surface's character of the metallic first mirrors changes when the first mirrors made from polycrystalline W, SS, Mo located at different areas on the first wall of HT-7 were exposed to the plasma. was strdied After the experiment, the reflectivity of these mirrors and the component of their surface were analyzed in order to researching the change of their surface's character. The results obtained show that the diffuse reflectivity of the mirrors made from three different materials has much change, at the same time, the specular reflectivity of mirrors made from W material has the least change. The results also show that the condition the mirrors located decides the change of the mirrors' surface.

[Key words] First mirror; Reflectivity; Sputtering technology; Deposition; Surface morphology

0 引言

在磁约束核聚变实验装置中, 等离子体运行状态与控制信号等的探测主要依靠各种光学诊断系统, 但这些光学诊断系统的使用往往受到很多因素(如光路问题)的影响。随着核聚变研究的进展, 聚变装置的规模越来越大, 特别是偏滤器结构的使用, 使得装置中的许多光学诊断系统都必须在装置的真空室内设置反射镜, 即第一镜(First Mirror 简称 FM), 比如汤姆逊散射与远红外测量等。第一镜必将是很多大型核聚变实验装置中光学诊断系统的重要组成部分, 如在国家热核聚变实验堆(ITER)中有一半以上诊断系统需使用第一镜。由于这些第一镜放置在装置的真空室内直接面对等离子体, 必将受到来自等离子体的中子和 α 粒子的轰击、 x 与 γ 射线的辐照以及从偏滤器与第一壁溅射腐蚀出的各种杂质的污染。这些作用会严重影响第一镜的表面光学特性(主要是反射率), 使其使用寿命缩短^[1]。

世界上这个领域的科学家们, 近年来对第一镜进行了很多研究。研究发现只有金属第一镜才有可能在聚变装置中获得相对较长的使用寿命^[2]。至目前为止, 许多实验室针对各种作用引起金属第一镜表面特性的变化进行了模拟实验。实验通过模

拟各种粒子轰击与射线辐照作用对金属第一镜表面的影响发现, 在第一镜受到的各种作用中, 真空紫外线与 γ 射线等的辐照主要对镜表面起到加热作用, 高能中子辐照主要造成反射镜内部发生体积变化^[3]。这两者虽对第一镜有影响, 但还不是引起第一镜的反射率和使用寿命降低的主要因素。引起第一镜退化的主要因素之一是荷能粒子的轰击, 特别是从高温等离子体中通过电荷交换产生的中性原子(CXA)。荷能粒子对镜表面起到溅射作用, 引起第一镜材料表面结构与性能发生变化(比如使镜表面粗糙度变大), 进而使得第一镜的镜面反射率下降、使用寿命缩短^[4,5]。另一个更主要的因素是杂质引起的镜表面污染, 第一壁材料被等离子体溅射腐蚀出后, 通过等离子体输运作用, 最后在第一镜表面上发生再沉积, 这些再沉积的第一壁材料造成镜表面污染。通过模拟实验已初步获得一些在溅射起主要作用时第一镜表面特性变化的结论^[6,7], 但有关沉积作用的影响现今只有简单的模型^[8], 针对沉积层引起的第一镜表面特性退化还没有具体的结论。本文主要围绕长脉冲运行的 HT-7 超导托卡马克中再沉积等作用对第一镜表面特性的影响进行了研究。

1 HT-7 超导托卡马克中的试验

1.1 试验条件

HT-7 超导托卡马克装置(大半径 $R = 1.22\text{m}$, 小半径 $a =$

[收稿日期] 2007-03-16

[作者简介] 李仁红(1981-), 女, 山东泰安人, 硕士, 研究方向: 等离子体物理。

0.27m)是我国目前正在运行的超导磁约束核聚变实验装置,它是一种圆型截面的、具有极向和环向石墨限制器的限制器位形超导托卡马克装置。此次试验(2006 春季试验),装置运行时间大约为 40d,其中的放电过程有调试放电、高参数放电、长脉冲放电等。试验放电前进行了烘烤、硼化等壁处理,在放电过程中也穿插了这些常规壁处理过程,放电结束后进行了氧化实验。此次试验的主要参数: $I_p = 100 \sim 250\text{kA}$, $B_t = 1 \sim 2.5\text{T}$, $n_e = 0.8 \times 10^{19} \sim 3 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$;等离子体边界参数: $T_e = 40 \sim 100\text{eV}$, $n_e = 1 \times 10^{18}\text{m}^{-3}$,总的放电炮数是 5347 炮,由低杂波(LHCD)加热的炮数为 3203 炮,LHCD 的能量范围是 $0 \sim 650\text{kW}$,离子波恩斯坦波(IBW)系统的能量范围是 $50 \sim 380\text{kW}$ 。工作气体是氢气或者其同位素氘气。

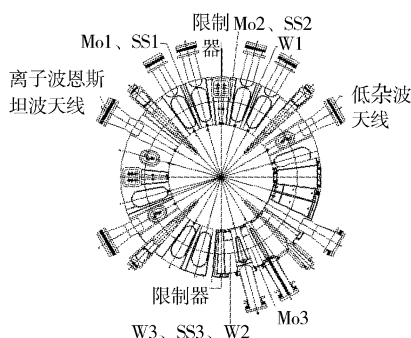


图1 第一镜样品在 HT-7 装置中的分布图

Figure 1 The location of the first mirror specimens in HT-7 set-up

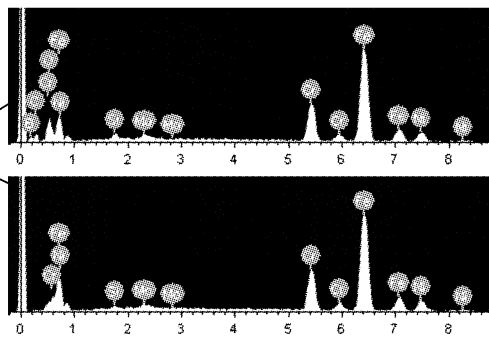
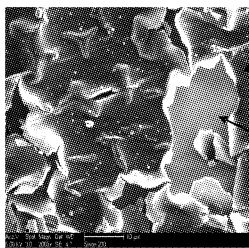


图2 不锈钢样品 SS2 的表面形貌和表面成分

Figure 2 The SEM image of specimen SS2 and the component of the surface

2 试验结果及分析

2.1 周围环境对第一镜表面特性的影响

试验结束经分析发现,分布在装置的驱动或加热天线较少的南边极向限制器附近的样品表面与分布在较多加热天线的北边极向限制器附近的样品表面有很大变化差异。安装在北边极向限制器附近、处在低杂波天线和离子波恩斯坦波加热天线之间的样品表面都有一层沉积物,最明显的是中间的样品 SS2 (见图 2)。

通过 EDS 分析其表面成分发现,不锈钢样品 SS2 表面的沉积物主要包括碳、硼和氧。这些元素与装置内主要的杂质(主要是来自石墨限制器的碳元素、来自壁处理中硼化过程的硼和装置内未除净的氧或氧化作用中的氧)相吻合,而沉积层下的 SS2 材料成分没有发生变化、表面形貌也几乎未变。但同样处在装置北侧、距离低杂波天线最近的钨样品 W1 表面靠近低杂波天线的一侧则出现溅射现象,如图 3 所示。在同一轮试验中,南边极向限制器附近、距离低杂波加热天线最远的样品 W3、SS3 表面基本没有发生变化。

由此可见,距离低杂波天线最近的样品表面出现了溅射现象;而稍微远离该加热天线,处于该天线与离子波恩斯坦波加热天线中间的样品表面则出现严重的沉积现象;远离这两个加热天线受限制器保护的样品表面几乎没有发生变化,其各种反射

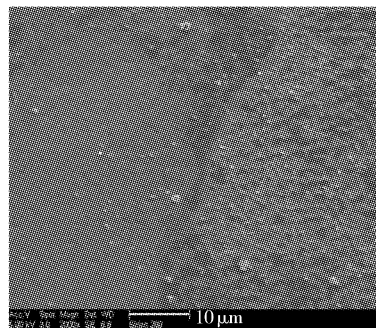


图3 钨样品 W1 的表面形貌

Figure 3 The SEM image of specimen W1

1.2 样品制备及安装

在 HT-7 超导托卡马克装置的第一镜试验中,所选用第一镜材料是多晶金属材料钨、钼和 316L 不锈钢。样品通过线切割成型后,再进行表面机械打磨,然后表面抛光处理制备而成。通过设计好的样品架,把样品直接固定在装置真空室中测量好位置的第一壁上(见图 1),样品分别布在 HT-7 超导托卡马克装置南边或北边的极向限制器附近区域,保持所有样品的上表面都低于下限制器上表面大约 3cm。

经粗略分析可知,这个区域是杂质沉积和溅射共同作用的区域。由于样品直接固定在装置第一壁上,所以在整个等离子体的辐照过程中无法实时测量第一镜的表面特性。

率都保持较好。

所以可以断定:低杂波天线和离子波恩斯坦波加热天线引起附近区域产生较多的杂质粒子,这些粒子在靠近加热天线的区域具有较高的能量,而在较远的区域能量较少,所以导致靠近低杂波天线的样品表面出现溅射,而处于两个加热天线中间区域的样品的表面出现严重沉积,远离这两个加热天线的样品的表面几乎没有受到什么影响。

2.2 不同材料第一镜的表面特性差异

第一镜表面特性的变化,即表面形貌变化和反射率变化不仅因受到不同环境下的不同作用而不同,也因第一镜材料的不同有所不同。

1) 第一镜样品 SS2、Mo2、W1、Mo1 和 SS1 在装置中所处周

围环境相对相似(见图1),但从其表面形貌、镜面反射率和漫反射率两个方面进行观测和分析发现,试验中它们的表面特性所发生的变化有很大的差异。从图2可以看出,不锈钢样品SS2第一镜的表面有一层很厚的沉积层,Mo2的表面变化类似于SS2。W1样品则出现两种不同的形貌(见图3),一侧表面保持较好,另一侧靠近低杂波天线的部分表面出现溅射,表面形貌发生很大的变化。Mo1和SS1样品表面有沉积层剥落的现象,只是剥落的程度不同。

至于它们表面的光学特性,利用分光光谱仪观测这几块第一镜样品的反射率和漫反射率,结果是它们的反射率也有很大的差异。图4为各样品的镜面反射率变化的对比。W1镜面反射率下降较大,但其随波长变化曲线还是较有规律,没有很明显的变化;Mo1和SS1镜面反射率受到残留在表面的沉积物的影响发生下降,尤其是不锈钢样品SS1。SS2、Mo2镜面反射率都已基本丧失,无法准确测量。

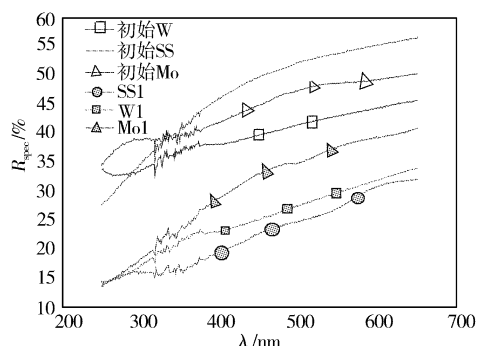


图4 样品SS1、Mo1、W1的镜面反射率

Figure 4 The specular reflectivity of specimens (SS1, Mo1, W1)

图5为这几块样品漫反射率变化的对比,从图中可以看出,沉积对不锈钢第一镜漫反射率的影响比对钼材料第一镜的影响严重,溅射引起表面粗糙度的变化使钨样品发生严重的漫反射变化。总之,在相似的沉积条件下钼材料第一镜的镜面反射率和漫反射率都比不锈钢保持得好,而溅射条件下钨第一镜镜面反射率变化较小,但漫反射变化严重。

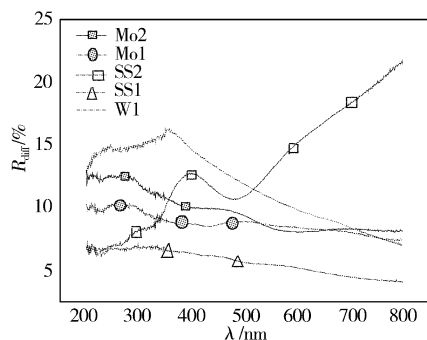


图5 样品SS1、Mo1、SS2、Mo2、W1的漫反射率

Figure 5 The diffuse reflectivity of specimens (SS1, Mo1, Mo2, W1)

2) 安装在装置南边、远离低杂波和波恩斯坦波天线的样品中,样品SS3和W3不论是直观目测还是通过电子扫描电镜(SEM)观测它们的表面,都可发现其表面保持较好,表面几乎没有受到作用的痕迹。它们的镜面反射率也只有轻微的下降(见图6)。

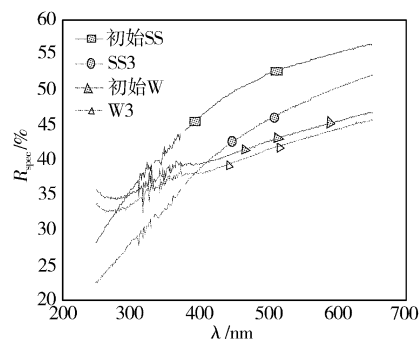


图6 样品SS3和W3的镜面反射率曲线

Figure 6 The specular reflectivity of the specimen SS3, W3

对于南边的另两块样品W2和Mo3, W2表面散布有不规则斑点, Mo3表面颜色变化而且失去了光泽。用SEM观测W2表面,发现W2表面的变化部分是一些沉积物(见图7),但这些不规则斑点似的沉积物没有完全覆盖表面,只是散布在样品表面。Mo3表面光泽度完全消失,表面颜色也发生变化,但用SEM观测表面没发现明显的沉积或溅射迹象;用EDS测量成分,发现此样品表面的氧含量高其它样品,所以推测样品Mo3表面颜色变化应该是表面发生氧化作用引起的,但也可能是温度引起的。对比它们的镜面反射率发现, W2的镜面反射率只有微小的变化,而且随波长变化曲线的变化也很小(见图8),这可能是由于其表面的沉积物较弱或是因沉积物没有完全覆盖其表面,也可能是两者共同作用的结果。而Mo材料第一镜颜色变化引起反射率的严重下降(见图8)。

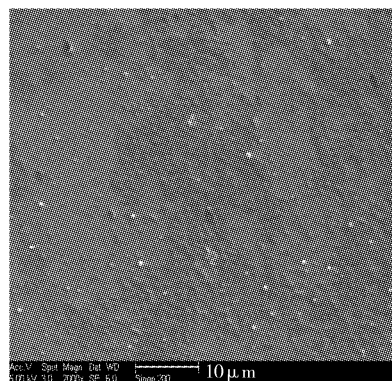


图7 用SEM观测的样品W2的表面形貌

Figure 7 The SEM image of specimen W2

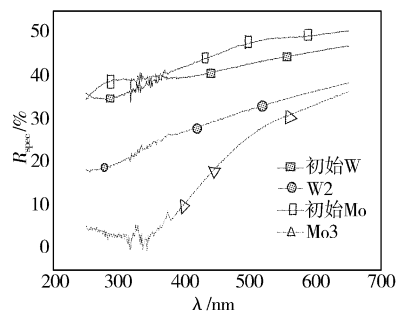


图8 样品W2和Mo3的镜面反射率曲线

Figure 8 The specular reflectivity of specimens W2, Mo3

图9是安装在装置南边的所有样品的漫反射率,从图中可以

发现,钨样品表面的漫反射率因其表面的沉积物升高了很多;W2 样品表面保持较好而且没有沉积物,所以其表面的漫反射率保持较好,其漫反射相对较高是由于钨材料难加工,所以钨样品的初始漫反射率就较高。SS3 样品表面保持较好,所以其漫反射率也保持较低。样品 Mo3 表面漫反射率变化则很小,这从另一方面说明了样品 Mo3 表面形貌保护较好,表面发生杂质沉积或粒子溅射作用,其表面颜色是镜面反射率变化的主要原因。

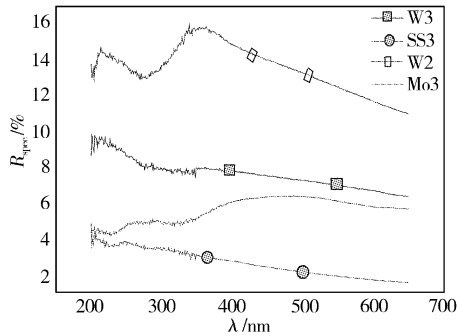


图9 南侧所有样品的漫反射率
Figure 9 The diffuse reflectivity of the specimens
located in the south area of HT-7

3 结 论

第一镜安装在装置中的不同位置,所受到的溅射作用和沉积作用不同,导致第一镜的表面特性变化各异,如本文所研究的处在低杂波与离子波恩斯坦波天线附近的第一镜,其表面形貌变化程度以及反射率下降程度都比其它区域的更大。第一镜表面形貌变化中,其表面的沉积物会引起第一镜反射率根本性的变化,而粒子的溅射只会使得第一镜的反射率整体下降,而不会引起反射率曲线的变化。

对比钼、钨、不锈钢三种材料的第一镜发现,钨材料第一镜的镜面反射率随表面形貌变化而下降,但随表面形貌变化,镜面反射率曲线变化最小,所以钨材料第一镜应该是这三者中变化

最规律的。如果钼材料第一镜表面没有发生颜色变化,那么其镜面反射率以及漫反射率都可能保持最好。不锈钢第一镜材料在各种作用下的表面形貌变化最大,镜面反射率下降得也最多,同时漫反射率变化也最大。

[参 考 文 献]

- [1] M Von Hellermann, Barnsley R, Lotte P, et al. Pilot experiments for the International Thermonuclear Experimental Reactor active beam spectroscopy diagnostic[J]. Review of Science and Instrument, 2004, 75(10): 3458-3461
- [2] Voitsenya V S, Gann V T, Gritsyna V T, et al. Overview metal mirrors' prospects in fusion reactor[J]. Plasma Physics Report, 1994, 20:217-221
- [3] Voitsenya V S, Gritsyna V I, Gritsyna V T, et al. On the influence of fusion reactor conditions on optical properties of metallic plasma-viewing mirrors[J]. Fusion Engineer and Design, 1997, 34/35: 365-368
- [4] Voitsenya V S, Bardamid A F, Gritsyna V T, et al. On the choice of material for the first mirrors of plasma diagnostic in a fusion reactor [J]. Journal of Nuclear Material, 1998, 258-263:1919-1923
- [5] Voitsenya V S, Becker M F, Bardamid A F, et al. Some problems of the material choice for the first mirrors of plasma diagnostics in a fusion reactor[J]. Review of Science and Instrument, 1999, 70(1): 790-793
- [6] Voitsenya V S, Costley A E, Bandourko B, et al. Diagnostic first mirrors for burning plasma experiments[J]. Review of Science and Instrument, 2001, 72(1): 475-482
- [7] Voitsenya V S, Bardamid A F, Bondarenko V N, et al. Some problems arising due to plasma-surface interaction for operation of the in-vessel mirrors in a fusion reactor[J]. Journal of Nuclear Material, 2001, 290-293: 336-340
- [8] Voitsenya V S. Analysis of the mechanism and source of contamination of diagnostic windows in fusion devices[J]. Journal of Nuclear Material, 1998, 258-263: 658-661

(上接第3页)

- [1] Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2004. 907-909
- [2] 张云乾,丁彰雄,范毅. HVOF 喷涂纳米 WC-12Co 涂层的性能研究[J]. 中国表面工程, 2005, 18(6):25-29
- [3] Morks M F, Shoeib M A, Brahim A L. Comparative Study of Nanostructured and Conventional WC-Co Coatings [A]. Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application[C]. Düsseldorf, Germany: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2004. 731-734
- [4] 郭铁波,周细应,林文松,等. 纳米热喷涂技术的研究现状与展望[J]. 表面技术, 2003, 32(4):1-3
- [5] Kim J H, Baik K H, Seong B G, et al. The influence of post-treatment on the wear properties of nano-structured WC-Co coatings [A]. Thermal Spray 2005: Explore its Surfacing Potential[C]. Düsseldorf, Germany: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2005. 494-497
- [6] Guilemany J M, Dosta S, Nin J, et al. Comparative study of the prop-

- erties of WC-Co nanostructured and bimodal coatings sprayed by high velocity oxy-fuel(HVOF) [A]. Thermal Spray 2005: Explore its Surfacing Potential[C]. Düsseldorf, Germany: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2005. 530-534
- [7] Song X, Liu W, Cui Y, et al. Influence of WC-Co type thermal spray powder characteristics on HVOF coating properties[A]. Thermal Spray 2005: Explore its Surfacing Potential[C]. Düsseldorf, Germany: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2005. 1105-1108
- [8] Marple B R, Lima R S. Process temperature-hardness-wear relationships for HVOF-sprayed nanostructured and conventional cermet coatings [A]. Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology[C]. Materials Park, USA: ASM International, 2003. 273-282
- [9] Bartuli C, Valente T, Cipri F, et al. A Parametric Study of an HVOF Process for the Deposition of Nanostructured WC-Co Coatings [A]. Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology[C]. Materials Park, USA: ASM International, 2003. 283-289