

# 紧凑型氘氘中子发生器中钛自成靶实验研究

冯子楠<sup>1,2</sup> 徐伟<sup>2\*</sup> 李旭<sup>2</sup> 吴亮亮<sup>1,2</sup> 孟献才<sup>2</sup> 王纪超<sup>2</sup> 钱玉忠<sup>2</sup> 王维海<sup>1,2</sup> 耿成龙<sup>1,2</sup> 梁立振<sup>2</sup> 胡纯栋<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 材料科学与工程学院 淮南 232000;

2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室) 合肥 230031)

## Experimental Study of Titanium Driven-in Targets in Compact D-D Neutron Generator

FENG Zinan<sup>1,2</sup>, XU Wei<sup>2\*</sup>, LI Xu<sup>2</sup>, WU Liangliang<sup>1,2</sup>, MENG Xiancai<sup>2</sup>, WANG Jichao<sup>2</sup>, QIAN Yuzhong<sup>2</sup>,  
WANG Weihai<sup>1,2</sup>, GENG Chenglong<sup>1,2</sup>, LIANG Lizhen<sup>2</sup>, HU Chundong<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China;

2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

**Abstract** Deuterium target, as one of the key components in the neutron generator, directly affects the neutron yield of the neutron generator. The key issues in the design, fabrication, characteristics and experiments of the titanium drive-in target were systematically studied in this article. First, oxygen-free copper material is used for the target substrate with a dedicated water loop in order to reduce the target surface temperature during accelerator operation. According to the results of the ANSYS simulation and electron gun experiment, the target surface temperature was controlled below 200°C well during neutron generator operation. Second, a micron pure titanium film was coated on the target substrate surface through magnetron sputtering technology. The structure and properties of the titanium film were analyzed by a scanning electron microscope, an X-ray diffractometer and a nano-scratch instrument. The results showed that the titanium film was coated uniformly and densely on the surface. The adhesion between the titanium film and substrate is about 0.22 N. Finally, In the ICP neutron generator, the neutron yield reached  $1.25 \times 10^8$  n/s, and in the ECR neutron generator, the neutron yield reached  $1.75 \times 10^8$  n/s; both achieved 5 hours of stable operation.

**Keywords** Neutron generator, Driven-in target, Magnetron sputtering, Titanium film

**摘要** 靶作为氘氘中子发生器关键部件之一,其性能直接影响了中子发生器的中子产额及其稳定运行。文章从钛自成靶的设计、制备、表征及测试四个方面系统的介绍了中子发生器中靶的关键技术实验研究。首先,为满足靶的温度控制需求,采用无氧铜作为靶基底材料,并在其内部开设套环式主动水冷回路。通过 ANSYS 热工模拟靶在加速器运行时的表面温升情况,并利用电子枪轰击测试靶表面实际温度变化情况。模拟和测试结果表明,在中子发生器运行期间,靶表面温度可以有效控制在 200°C 以内。随后,利用直流磁控溅射技术在无氧铜靶衬底表面制备微米级高纯靶膜。并且,利用扫描电子显微镜、能谱仪、X 射线衍射仪和划痕仪研究了靶膜表面的微观结构、成分及膜基结合力。结果表明利用磁控溅射制备的钛膜表面十分均匀紧凑,以六方晶系结构的  $\alpha$ -Ti 沉积在靶衬底表面,钛膜与基底的膜基结合力为 0.22 N。最后,在感应耦合型中子发生器中子产额达到了  $1.25 \times 10^8$  n/s,电子回旋共振中子发生器中子产额达到了  $1.75 \times 10^8$  n/s,都实现了稳定运行 5 h。

**关键词** 中子发生器 自成靶 磁控溅射 钛膜

中图分类号: O571.53

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202403003

中子具有不带电且穿透力强的特性,是研究物质结构和动力学性质的理想探针,在核能、无损检

测、材料研究等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。中子的发生装置一般分为放射性中子源、反应堆中子源和加

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室)项目(21KZS202; 21KZS208); 国家自然科学基金项目(12105135; 12305200); 安徽省自然科学基金项目(2308085MA22)

\* 联系人: E-mail: xuwei@ie.ah.cn

速器中子源, 加速器中子源以其特有的中子产额高、可控性好、造价较低等优点受到广泛关注<sup>[2]</sup>。紧凑型氘氦中子发生器作为一种小型、高效的加速器中子源, 其便携式可移动的特点以及可以满足大多数应用与研究的中子场强度, 在中子技术应用方面有着广阔的应用前景<sup>[3-4]</sup>。紧凑型氘氦中子发生器的离子源中的电子在磁场作用下与氘气发生碰撞产生氘离子, 产生的离子由加速电极引出轰击到靶上, 氘离子束与靶中的氘粒子碰撞发生核聚变反应产生中子。靶是氘粒子沉积的载体, 靶的性能直接影响着中子发生器的性能, 也决定了中子发生器的寿命。靶的形式主要有两种: 自靶, 即在靶衬底表面利用镀膜或焊接的方式沉积一层吸附氘粒子的靶膜; 吸附靶, 即在制备好的自靶基础之上, 在靶膜中吸附一定比例的氘气粒子。

在靶产生中子的实际应用中, 氘粒子的富集度以及靶表面温度的控制是其关键的难点。为实现靶中氘粒子的高富集度的需求, 靶的材料选择至关重要。目前常见的吸氢性能较好的材料有钛、锆、钒、镁系合金等, 其中金属钛的吸氢密度高达  $9.2 \times 10^{22}$  氢原子/cm<sup>3</sup>, 是一种吸氢密度很高的金属, 其优异的储氢及其同位素的性能成为近些年研究氘氦加速器中靶膜材料的热点<sup>[5-6]</sup>。紧凑型氘氦加速器的高压一般在 200 kV 左右, 因此氘离子束经高压加速之后轰击到金属钛中的射程非常小, 通过 SRIM 模拟程序约为 1.3  $\mu\text{m}$ , 实际应用中选择合适的靶膜厚度会影响靶的使用性能。金属钛元素通常以薄膜的形式沉积在靶的表面, 钛薄膜在靶衬底表面的纯度、均匀性以及结合力都会影响靶的性能。此外, 靶的温度控制是靶的整体性能另一重要参数, 离子源产生的氘离子束经高压加速后, 持续轰击在靶上时会产生大量热量, 当靶的温度超过 200 $^{\circ}\text{C}$  时, 会引起靶膜中的氘粒子释放, 降低氘与氘的碰撞几率从而导致中子产额降低, 影响中子发生器的高性能稳定运行<sup>[7-8]</sup>。

目前, 国内外关于中子发生器氘靶的制备集中在靶结构的调整、靶膜的制备工艺和靶膜氧化保护等方面。刘玉国等<sup>[9]</sup>对自靶进行了热流固耦合分析, 研究了两种不同靶结构冷却水流量和冷却水层厚度对靶表面温度影响, 结果显示增加冷却水流量可以显著降低靶表面温度, 增加冷却水层厚度并不能提高靶的散热效果。艾梦婷等<sup>[10]</sup>对中子发生器

用 TiMo 合金薄膜制备氘靶并分析了其储氢性能, 显示当提高氘靶制备的基底温度时, TiMo 薄膜的储氢量得到明显的提升, 证明了靶膜材料的制备工艺也是影响靶膜吸附氢的重要因素之一。Guo 等<sup>[11]</sup>对靶薄膜材料进行优化, 对比三种不同掺杂比的合金靶(钐-钛、钼-钛、铌-钛)的中子产额测试, 得到不同掺杂比对密封中子管中子产额和靶膜抗氧化性、抗溅射性的影响, 靶膜材料的选择也会影响靶的中子产额。

本文从靶的结构设计、热工水力模拟、热负荷测试、薄膜制备及其表征以及中子产额测试, 系统介绍了应用于紧凑型氘氦加速器的钛自靶特性, 通过优化设计靶衬底水冷结构实现了靶温的有效控制, 利用直流磁控溅射技术发展了一套靶膜制备工艺, 并开展了钛薄膜的微观组织结构、力学性能等研究, 为未来紧凑型氘氦中子发生器靶的设计和制备提供了参考。

## 1 实验装置

为了实现长脉冲稳定高产额中子产生, 基于离子源的产生原理实验室自主搭建了两套不同类型的中子发生器: 感应耦合(ICP)型中子发生器和电子回旋共振(ECR)型中子发生器。ICP 型中子发生器由高频电流经感应线圈产生磁场, 交变的磁场感应出环形电场, 电子被电场加速通过电离碰撞等过程产生等离子体<sup>[12]</sup>。ICP 型中子发生器包括等离子体发生器、离子引出加速系统、靶和真空抽气机组等。ECR 型中子发生器产生等离子体的原理是微波角频率与电子回旋加速器频率相同时, 在共振作用下电子吸收能量形成高能电子, 电子具有极大的能量电离气体产生高密度等离子体<sup>[13-14]</sup>。ECR 型中子发生器包括等离子体产生发生器、电极引出系统、靶、真空机组、集成控制系统及中子测量等。靶对于 ICP 型和 ECR 型中子发生器来说都是其关键部件之一, 无论是 ICP 型还是 ECR 型中子发生器都需要引出氘离子束轰击靶产生中子, 在 ICP 离子源和 ECR 离子源分别进行中子发生实验测量中子产额, ICP 离子源工作条件为氘离子束能量约 78 kV、射频功率 360 W; ECR 离子源工作条件为电压 75 kV、微波功率 500 W, 分别检测束流强度并记录中子产额。靶的性能决定了中子发生器的中子产额高低, 研究靶的性能对中子发生器的稳定运行及应用非

常重要。

## 2 实验结果

### 2.1 靶结构设计及热负荷测试

靶是加速器中子源中氦粒子沉积的载体,也是氦离子束轰击发生聚变反应产生中子的对象。通常靶主要包含两个部分:沉积氦粒子的载体-靶膜和承载靶膜的靶衬底。在加速器中子源运行时,氦离子束持续轰击在靶表面,产生大量的热量将释放靶膜中吸附的氦。为实现靶温度的有效控制,首先选择导热性能优异的无氧铜或铬锆铜作为靶衬底材料,其次在无氧铜或铬锆铜材料的靶衬底内部开设主动水冷通道,实现在加速器运行期间对靶进行主动水冷换热。图1展示了靶衬底内部开设的主动水冷回路剖视图和侧视图,该主动水冷回路整体呈现为套环式结构,冷却水从靶衬底边缘位置流入,经四次环状通道流通后从靶衬底中心流出,再经过冷水机冷却之后回到入口,形成一个闭环冷却水回路。该靶直径为150 mm,厚度15 mm,内部水冷回路的内径为8 mm。

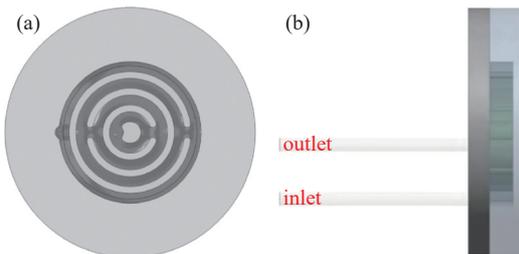


图1 靶衬底内部水冷回路。(a)剖视图,(b)侧视图

Fig. 1 Internal water-cooled circuit of target substrate. (a) Section view, (b) side view

完成氦靶结构设计之后,利用 ANSYS 有限元分析软件模拟了靶在氦离子束轰击时的温度分布。对于紧凑型氦气加速器中子源,其工作电压基本在0–200 kV 之间,氦离子束流大小在0–6 mA 之间,因此在使用 ANSYS 模拟靶的温升时,束流输入功率设置为1.2 kW、束斑大小为直径 $\Phi 80$  mm、功率密度 $0.24 \text{ MW/m}^2$ 。如下图2所示,模拟结果表明,在冷却水入口流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 及入口静压1617 Pa的条件下,靶上温度上升区域主要集中在束斑范围之内,其中靶中心位置最高温度约为 $40^\circ\text{C}$ ,远远低于目标 $200^\circ\text{C}$ ,满足中子源对靶温度控制的需求。此外,为测试靶衬底实际的热移除能力,对裸靶衬底进行电

子枪稳态热负荷测试。测试过程中,靶的冷却水流量定在 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,受限于电子枪的扫描区域,测试中扫描范围为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。电子枪束高压设定为35 kV,电子束束流从20 mA扫描至120 mA,每次束流增加10 mA。图3展示了靶在电子枪热负荷测试过程中的红外相机测量的靶表面温度分布图。靶在4.2 kW功率电子束轰击下且束流轰击集中在靶中心位置,测试结果显示靶中心位置平均温度 $40.18^\circ\text{C}$ ,有几个热斑点温度超过80摄氏度。在后续实际使用靶过程中,1.5  $\mu\text{m}$ 左右厚度的钛膜并未影响靶的冷却效果。

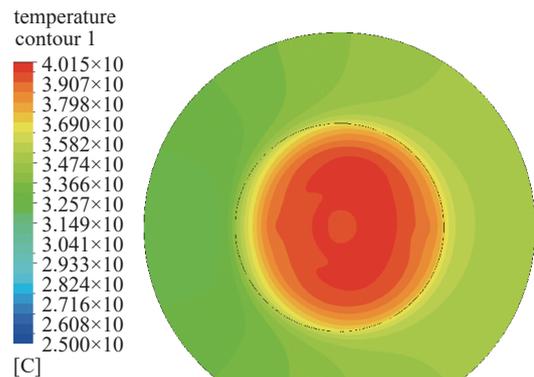


图2 ANSYS 模拟靶水冷温度分布

Fig. 2 ANSYS simulation of water-cooling temperature

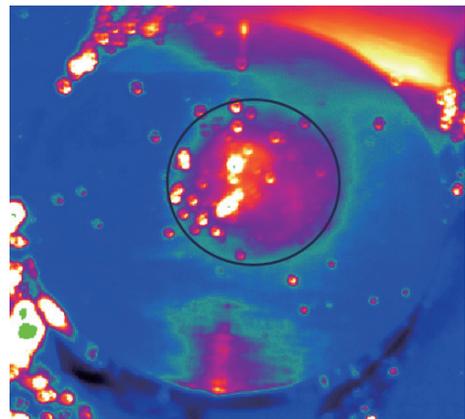


图3 红外相机测量靶温度分布

Fig. 3 Measurement of temperature distribution of targets using infrared cameras

### 2.2 靶膜制备

为实现微米量级高纯钛膜的制备,本实验中采用磁控溅射技术制备钛膜。磁控溅射镀钛的原理是在电场作用下腔室中通入的氩气被电离后加速轰击钛靶材,钛原子从钛靶材表面被溅射出飞向衬

底淀积成膜。在进行磁控溅射制备钛膜之前,首先需要靶衬底表面进行清洗,去除表面氧化层,保证靶衬底表面的洁净度。无氧铜靶衬底经过表面抛光处理,去离子水超声清洗、无水乙醇清洗后在惰性气体氩气保护下放入镀膜腔室。为避免钛膜受其它杂质污染,溅射的靶材选用的是纯度大于 99.99% 的高纯钛,并且在溅射镀膜之前用真空抽气机组将真空腔室内真空度抽至  $1 \times 10^{-5}$  Pa,以降低腔室内残余杂质气体对钛膜的污染。为提高钛膜在靶衬底表面的沉积质量,首先将靶衬底加热至  $120^\circ\text{C}$ ,其次利用氩离子束对靶衬底表面进行放电清洗,进一步对样品表面进行除气及去除氧化层,完成样品表面清洗之后,正式开始磁控溅射制备钛膜。制备后钛膜呈现为银白色金属光泽,利用扫描电子显微镜观察其镀膜 120 min 膜厚为  $1.47 \mu\text{m}$ 。如图 4 所示为磁控溅射镀膜系统和制备钛膜时腔室辉光状态,溅射镀膜的参数如下表 1 所示。

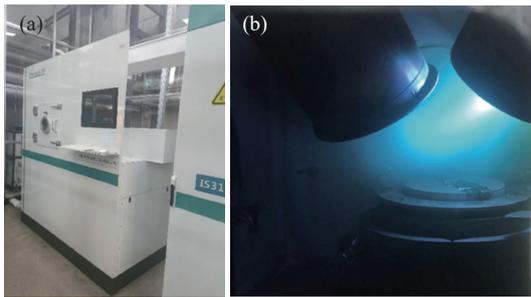


图4 磁控溅射制备钛膜。(a)磁控溅射系统,(b)镀钛辉光

Fig. 4 Preparation of titanium film by magnetron sputtering. (a) Magnetron sputtering system, (b) titanium plating glow

表 1 Ti 薄膜沉积参数

Tab. 1 Deposition parameters of Ti films

参数	Ti 膜
溅射气压/Pa	0.5
溅射功率/W	300
基底温度/ $^\circ\text{C}$	120
溅射时间/min	120
基底偏压/V	200
旋转速度/r/min	1

## 2.3 靶膜表面性能表征

### 2.3.1 SEM 表面形貌表征

靶的表面状态对加速器的稳定运行具有重要作用,当靶的表面存在毛刺点时容易引起尖端放电造成高压电源打火;当靶表面存在缝隙时则会在缝

隙处累积大量的电子,造成大量二次电子发生,影响加速器的稳定运行。本文完成靶膜制备之后,利用高分辨场发射扫描电子显微镜 SEM(Zeiss Sigma 300)和其附属能谱仪 EDS(X-Max 20)表征了钛薄膜表面的微观形貌及其化学成份组成。图 5(a)展示了 SEM 在 2000 倍率的放大下,钛膜在靶衬底表面呈现十分光滑、均匀致密,无明显毛刺点和裂痕存在。图 5(b)展示了钛薄膜在 50000 倍率的放大下,钛晶粒一个个紧簇生长在一起,表明磁控溅射制备的钛薄膜十分均匀紧致。表 2 展示了在钛膜表面随机选取一点的 EDS 能谱分析,其中 Ti 元素的比重占 90.59%, O 元素的比重为 8.78%, Ar 元素的比重占 0.38%, Cu 元素的比重占 0.25%。O 元素的出现可能是在靶膜样品在转移或检测过程中受到了空气氧化。Ar 元素是在氩离子束溅射靶材过程中沉积在薄膜内,而 Cu 元素则是 EDS 穿过薄膜打到基底铜材料造成的。

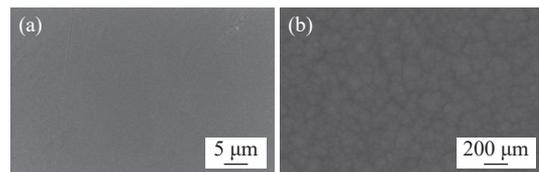


图5 不同倍率下钛自靶膜 SEM 图。(a)2 k 倍率,(b)50 k 倍率

Fig. 5 SEM images of titanium driven-in target films at different magnifications. (a) 2 k magnification, (b) 50 k magnification

表 2 薄膜的 EDS 成分测试结果

Tab. 2 Films composition measured by EDS

元素	质量百分比	原子百分比
O	8.78	22.37
Ar	0.38	0.39
Ti	90.59	77.08
Cu	0.25	0.16
总量	100.00	100.00

### 2.3.2 X 射线衍射分析 XRD

图 6 展示了对靶薄膜进行 X 射线衍射分析结果,通过与钛的 XRD 标准卡相比钛膜衍射主峰的最大强度在  $52.880^\circ$ , 对应为 (102) 晶面,次衍射峰在  $38.439^\circ$ , 对应为 (002) 晶面。而基底无氧铜的衍射主峰最大强度在  $73.997^\circ$ , 对应为 (220) 晶面,次衍射峰在  $43.473^\circ$ , 对应为 (111) 晶面。通过 XRD 分析

表明利用上述磁控溅射制备的钛薄膜在无氧铜靶衬底表面呈现六方晶系结构的  $\alpha$ -Ti 存在, 且钛薄膜有很强的 (102) 择优取向, 图谱中没有出现其他金属氧化物的特征峰, 表明在钛的沉积过程中并未形成其他金属氧化物。

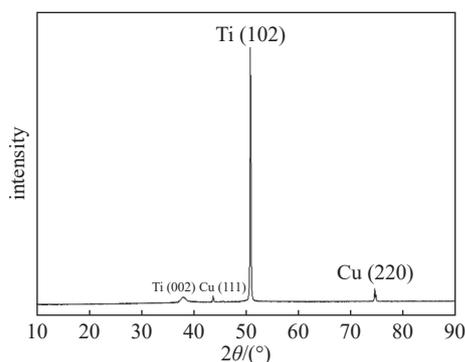


图6 无氧铜镀钛膜 XRD 图谱

Fig. 6 XRD pattern of oxygen-free copper coated titanium film

### 2.3.3 膜基结合力

为了进一步研究靶衬底表面钛膜与靶基底的结合力, 利用微观组合测量仪 (Anton Paar MCT<sup>3</sup>) 对

无氧铜表面的靶膜样品进行纳米划痕实验。在划痕实验中, 实验载荷类型为线性加载, 最大载荷为 0.4 N, 划痕速度为 1 mm/min, 划痕长度为 0.5 mm, 在样品表面三个不同位置分别进行了划痕测试以确保实验准确性。利用声发射信号检测到薄膜破裂时首次发生突变的实时载荷, 作为其膜基结合失效的临界载荷<sup>[15]</sup>。划痕实验如图 7 所示, 随着载荷以及划痕长度的增加压头针尖从钛膜表面逐渐压入, 根据声发射信号和划痕成像系统共同分析作为区分膜基结合力: Lc1 为涂层开始出现裂纹处, 涂层内聚力失效; 在 Lc2 为涂层开始剥落处, 膜与基底结合力开始失效; 在 Lc3 为涂层完全剥落处, 涂层结合力完全失效。在 Lc2 处声发射信号突变, 表明薄膜与基底结合力彻底失效, 因此取 Lc2 处为膜基结合失效的临界载荷。表 3 为无氧铜镀钛样品的三次纳米划痕测试结果, 得出 Lc2 平均值为 0.220 N, 表明钛薄膜与靶衬底无氧铜材料结合良好, 在后续多次超 500 h 的中子产额实验中钛膜未出现明显脱落现象。

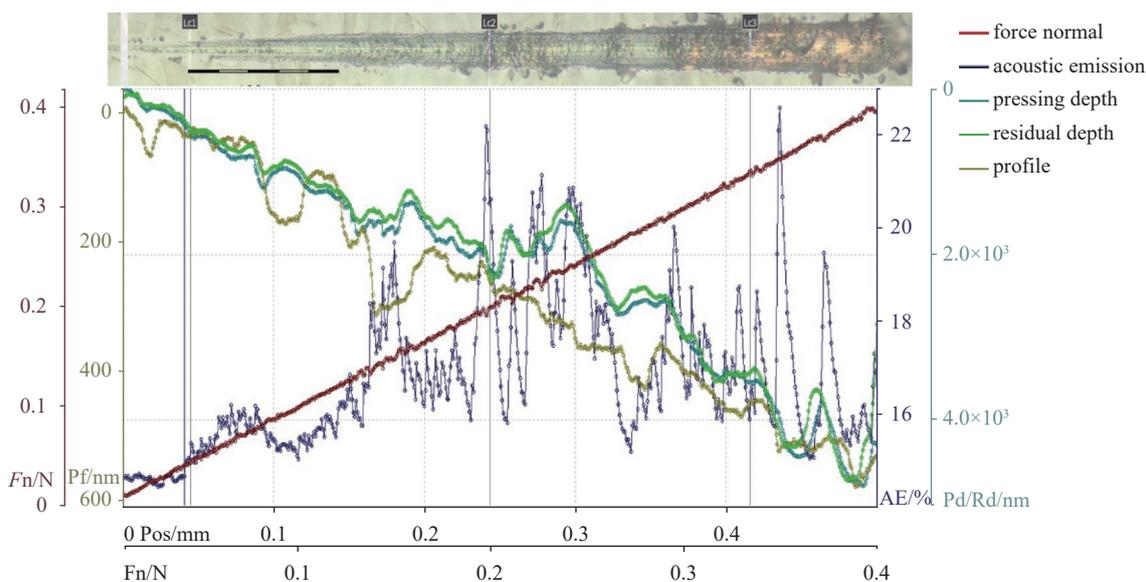


图7 无氧铜靶衬底表面钛膜纳米划痕测试

Fig. 7 Nano-scratch test of titanium film on the surface of oxygen-free copper target substrate

## 2.4 中子产额实验研究

最后, 为了验证钛自靶的综合性能, 在自主发展的 ICP 和 ECR 型中子发生器上分别开展了中子产额测试。图 8 展示了在两种紧凑型中子发生器上利用钛自靶获得的稳定八次方中子产额, 在 ICP 型中子发生器氩离子束能量约 78 kV、束流源

强约 3.58 mA、射频功率 360 W 时, 中子产额可达到约为  $1.25 \times 10^8$  n/s; ECR 型中子发生器利用相同工艺制备的钛自靶同样实现了稳定的八次方中子产额的获得, 在氩离子束能量约 75 kV、束流源强约 5.97 mA、微波功率 500W 时, 中子产额可达到约为  $1.75 \times 10^8$  n/s, ICP 和 ECR 中子发生器在长达 5 h 尺

表 3 膜基结合力的测试结果

Tab. 3 Measured data of the film-substrate adhesion

膜基结合力测试	Lc1/N	Lc2/N	Lc3/N
测试 1	0.043	0.199	0.335
测试 2	0.045	0.213	0.303
测试 3	0.057	0.250	0.362

度内, 仅出现少量打火现象, 表明该自成靶满足中子发生器稳定运行的需求。图 9 右侧展示了钛自成靶中子测试之后的实物图, 从图中可以看到靶膜在

氘离子束轰击完之后出现了明显的束斑, 并且钛膜出现了一些氧化现象, 这可能是由于在自成靶的安装过程中未进行有效保护, 导致钛膜表面出现了轻微的氧化。在未来的工作中, 需要优化自成靶的安装流程, 在安装的过程中充入流动的惰性气体氩气对自成靶表面钛膜尽可能的保护, 避免其受到空气氧化。此外, 下一步拟在自成靶钛膜表面涂覆一层纳米级厚度的防氧化涂层, 以解决靶在安装过程中的表面氧化问题。

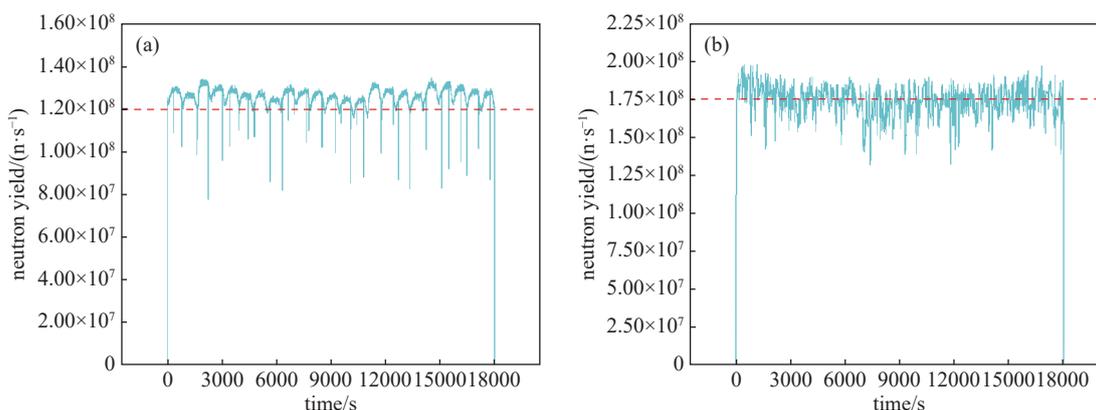


图 8 中子源中子产额图。(a)ICP 中子产额,(b)ECR 中子产额

Fig. 8 Neutron yield map of neutron source. (a) ICP neutron yield, (b) ECR neutron yield

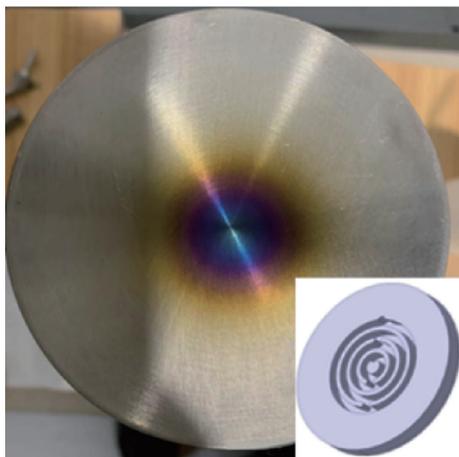


图 9 自成靶轰击后实物图

Fig. 9 Physical image after bombardment with a driven-in target

### 3 结论

本文基于紧凑型中子发生器中关键部件钛自成靶的制备, 系统研究了靶内部结构对靶表面温度的影响和靶表面镀钛膜的微观形貌及力学性能, 并

且成功在 ICP 型和 ECR 型中子发生器中分别进行了钛自成靶的中子产额测试。研究表明, 靶内部套环式水冷结构在 ANSYS 模拟和电子枪热负荷测试下都能满足将靶表面温度控制在  $200^{\circ}\text{C}$  以内的需求。利用磁控溅射镀膜技术成功实现了在无氧铜靶衬底表面微米级高纯钛膜的制备, 通过 SEM 技术对钛膜表面进行微观形貌分析显示钛膜在靶衬底表面十分均匀紧致, XRD 结果显示钛膜的相为六方晶系结构的  $\alpha\text{-Ti}$ , 纳米划痕结果表明钛膜与无氧铜基底的膜基结合力约为  $0.22\text{N}$ 。最后, 钛自成靶成功应用于 ICP 型和 ECR 型中子发生器, 并开展了中子产额测试。结果表明, ICP 中子发生器在氘离子束能量  $78\text{ kV}$ 、束流强度  $3.58\text{ mA}$ 、射频功率  $360\text{ W}$  时, 中子产额可达到约为  $1.25 \times 10^8\text{ n/s}$ ; ECR 中子发生器在氘离子束能量  $75\text{ kV}$ 、束流强度  $5.97\text{ mA}$ 、射频功率  $500\text{ W}$  时, 中子产额可达到约为  $1.75 \times 10^8\text{ n/s}$ 。通过对钛自成靶的制备和性能的分析研究, 促进了紧凑型 ICP 和 ECR 中子发生器八次方稳定的中子的获得及运行, 为未来加速器进一步提高中子产额提供技术和数据参考。

## 参 考 文 献

- [1] Niu M, Wang G D, Shi Y L, et al. Application of tungsten target in spallation neutron source[J]. *Metal World*, 2024(2): 28–32 (牛曼, 王广达, 史英丽, 等. 钨靶在散裂中子源中的应用 [J]. *金属世界*, 2024(2): 28–32 (in Chinese))
- [2] Jiang Q Y, Wang Y X, Peng J Q, et al. Study on characteristics of neutron source in thick target low to intermediate energy  ${}^9\text{Be}(d, xn)$  reaction accelerator[J]. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(3): 396–404 (江桥月, 王艺璇, 彭锦秋, 等. 厚靶低中能 ${}^9\text{Be}(d, xn)$ 反应加速器中子源特性研究 [J]. *原子核物理评论*, 2022, 39(3): 396–404 (in Chinese))
- [3] Wu K, Liu X Y, Yang X, et al.  ${}^{235}\text{U}$  enrichment detection system for nuclear fuel rod based on compact DD neutron generator[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64(9): 1940–1946
- [4] Fantidis J G, Nicolaou G E, Tsagas N F. Optimization study of a transportable neutron radiography unit based on a compact neutron generator[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 618(1-3): 331–335
- [5] Qiao Z, Li X, Lv Y, et al. Depositing a titanium coating on the lithium neutron production target by magnetron sputtering technology[J]. *Materials*, 2021, 14(8): 1873
- [6] Kromer H, Adams R, Soubelet B, et al. Thermal analysis, design, and testing of a rotating beam target for a compact DD fast neutron generator[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, 145: 47–54
- [7] Yao Z E, Chen S W, Su T L, et al. Numerical simulation of high-speed rotating tritium titanium target system design and target temperature[J]. *Nuclear Techniques*, 2004(10): 787–791 (姚泽恩, 陈尚文, 苏桐龄, 等. 高速旋转氚钛靶系统设计和靶温度的数值模拟 [J]. *核技术*, 2004(10): 787–791 (in Chinese))
- [8] Yan J, Liu M, Lin J F, et al. Coupled analysis of target temperature field and stress field under pulsed ion beam irradiation[J]. *Nuclear Techniques*, 2013, 36(5): 35–40 (言杰, 刘猛, 林菊芳, 等. 脉冲离子束作用下的靶温度场-应力场耦合分析 [J]. *核技术*, 2013, 36(5): 35–40 (in Chinese))
- [9] Liu Y G, Liu M, Ke J L, et al. Thermal-fluid-structure coupling analysis of deuterium target in small-scale D-D neutron generator[J]. *Nuclear Techniques*, 2017, 40(1): 28–33 (刘玉国, 刘猛, 柯建林, 等. 小型 D-D 中子发生器氘靶的热流固耦合分析 [J]. *核技术*, 2017, 40(1): 28–33 (in Chinese))
- [10] Ai M T, Jiang H C, Sun N K, et al. Preparation of TiMo alloy thin film tritium target for neutron generator and study on hydrogen storage performance[J]. *Electronic Components and Materials*, 2020, 39(7): 85–89 (艾梦婷, 蒋洪川, 孙宁恺, 等. 中子发生器用 TiMo 合金薄膜氚靶制备及储氢性能研究 [J]. *电子元件与材料*, 2020, 39(7): 85–89 (in Chinese))
- [11] Guo W T, Zhao S J, Jing S W, et al. Effect of target film materials on neutron yield of neutron tube with drive-in target[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 182: 109358
- [12] Zhang Y Q, Gao F, Wang Y N. Advances in simulation of low-pressure inductive coupled plasma sources[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(9): 39–55 (张钰如, 高飞, 王友年. 低气压感性耦合等离子体源模拟研究进展 [J]. *物理学报*, 2021, 70(9): 39–55 (in Chinese))
- [13] Zhao S J, Guo W T, Yu Z T, et al. Design of magnetic circuit and extraction system of ECR ion source for intense neutron tube[J]. *Vacuum*, 2020, 178: 109450
- [14] Yang Z H, Qi C, Zhang L X, et al. Optimization of irradiation experimental performance of ECR linear plasma device[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(11): 1058–1063 (杨志浩, 祁超, 张丽霞, 等. ECR 直线等离子体装置的辐照实验性能优化 [J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(11): 1058–1063 (in Chinese))
- [15] Zeng Z, Xiao F, Miao J G, et al. Evaluation and testing of bonding strength of micro-arc oxidation coating on ultra-hard aluminum 7A04 based on scratch Test[J]. *Materials Protection*, 2017, 50(11): 93–96 (曾舟, 肖峰, 苗景国, 等. 基于划痕试验的超硬铝 7A04 微弧氧化膜基结合力的测试与评定 [J]. *材料保护*, 2017, 50(11): 93–96 (in Chinese))