



·强流加速器与粒子束技术·

## 磁场调控型离子源的设计与实验\*

李 杰<sup>1,2</sup>, 董 攀<sup>1</sup>, 王 韬<sup>1</sup>, 刘尔祥<sup>1</sup>, 刘飞翔<sup>1</sup>, 何佳龙<sup>1</sup>, 龙继东<sup>1</sup>, 章林文<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 磁场调控型离子源在离子源等离子体扩散空间中引入轴向强脉冲磁场, 磁场起两方面的作用, 一是形成潘宁放电效应, 使原子、气体分子碰撞电离效率增加; 二是在脉冲强磁场的作用下, 强轴向磁场将质量较轻的离子约束在轴线上, 对质量较重的金属离子约束能力较弱, 导致其在等离子体膨胀引出通道中碰壁损失, 能够提升引出轻离子的比例。开展了磁场调控的离子源放电结构、强脉冲螺线管磁场以及引出束流光学结构的设计; 测量分析了引出离子流强和离子打靶束斑形貌。研究结果表明, 强轴向磁场通过等离子体对混合离子成分的筛选作用, 可有效提高引出离子流强中的轻离子成分比例。

**关键词:** 磁场调控; 离子源; 离子分离; 离子引出; 束斑测量; 中子产额

中图分类号: O461.2<sup>2</sup>

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210515

## Design and experimental study of magnetic field regulating ion source

Li Jie<sup>1,2</sup>, Dong Pan<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>1</sup>, Liu Erxiang<sup>1</sup>, Liu Feixiang<sup>1</sup>,

He Jialong<sup>1</sup>, Long Jidong<sup>1</sup>, Zhang Linwen<sup>1</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A magnetic field regulating ion source introduces strong pulsed magnetic field in the discharge plasma region of the ion source. On one hand, it forms Penning discharge effect to enhance the collision ionization efficiency of the atoms and gas molecules due to the magnetic field. On the other hand, the light ions are restrained along the axis by the strong magnetic field, but it can't restrain the heavy metal ions. This phenomenon results in the heavy ions loss by colliding wall of the plasma expansion extraction channel, so it promotes the ratio of the light ions. Discharge structure of a magnetic field regulating ion source and strong pulsed solenoid magnetic field, as well as the optic structure of extraction beam are designed and depicted in this paper. Intensity of extraction ion beam and beam spot on the target measured by scintillator screen are analyzed in this paper. The results show that the strong axial magnetic field increases the proportion of light ion components as the result of filtering effect for plasma with mixed ion component.

**Key words:** magnetic field regulating, ion source, ion isolation, ion extraction, beam spot measurement, neutron yield

真空弧放电离子源在离子束注入<sup>[1-2]</sup>、高电荷态离子加速器<sup>[2]</sup>、矿产探测<sup>[3-5]</sup>等领域有广泛的应用。真空弧放电通常为电极间真空击穿引起爆炸发射<sup>[2]</sup>, 从而形成高密等离子体。通常电极所含成分都将被电离形成等离子体<sup>[6]</sup>, 因此从真空弧放电等离子体中引出离子束通常为混合离子束。对于含氢金属材料电极的真空弧放电离子源, 氢原子或分子将在放电的过程中释放出来并电离成氢离子, 同时伴随有大量金属离子成分。在许多应用场合氢离子作为有效成分被引出加速, 引出离子成分中氢离子比例是该研究领域关注的重要参数<sup>[3-6]</sup>。磁场对于等离子体中电离以及离子成分调控具有显著影响<sup>[7-8]</sup>, 如 Oks 等人<sup>[9-10]</sup> 将磁场引入真空弧等离子体区域, 提高了金属真空弧放电离子源引出离子成分平均电荷态。本文研制了一种磁场调制型吸氢金属真空弧离子源, 基于磁场对等离子体中离子

\* 收稿日期: 2021-11-24; 修订日期: 2022-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11735012, 11905206, 11975217)

联系方式: 李 杰, [nlijie@sina.com](mailto:nlijie@sina.com)。

通信作者: 董 攀, [panner95@163.com](mailto:panner95@163.com)。

成分进行调制,在离子源等离子体扩散空间引入轴向强脉冲磁场,调控膨胀等离子体的成分参数,提升引出有效氢离子成分。磁场调制型离子源存在有两种物理机制:一是离子源阴极与引出外电场作为虚阴极,以及轴向磁场一同构成潘宁型的放电结构,被磁场约束的电子在阴极之间来回运动从而大大增加了电子的运动路径,使得与氢原子或者分子碰撞电离效率大大增加;二是在脉冲强磁场作用下,磁场足以对质量较轻的氢离子进行约束,从而使其沿磁力线做螺旋运动,对质量较重的金属离子,约束能力较弱,导致其在离子源引出通道中碰壁损失,能够有效提升引出氢离子成分<sup>[4]</sup>。本文开展了磁场调控的离子源放电结构、强脉冲螺线管磁场以及引出束流光学结构的设计;对引出离子流强、离子打靶束斑形貌以及氢同位素核反应出中子实验结果进行分析。

## 1 磁场调控型离子源设计

### 1.1 离子在轴向磁场中的运动

真空弧放电等离子体电子温度为数个 eV,真空弧放电等离子体中离子温度与电子温度相近。带电粒子在磁场中的运动半径由拉莫半径表示

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (1)$$

式中:  $m$  为离子静止质量,  $v$  为离子运动速度,  $q$  为离子电荷数量,  $B$  为磁场强度大小。

由此可知,当初始离子能量或速度相近的情况下,质量较轻的离子质荷比较小,回旋半径较小;质量较大的离子质荷比相对较大,回旋半径较大。以常见的含氢钛金属放电离子源为例,钛金属离子质荷比是氢离子质荷比十倍以上,设计适当的轴向离子输运通道,可以使得重金属离子极易碰壁损失,而相对较轻的氢离子可以沿着轴向强磁场的磁力线运动到离子源发射端口处,得到较纯的氢离子流。如图 1 所示,采用螺线管轴向磁场对轻、重离子运动轨迹进行仿真计算,磁场强度约为 0.7 T,螺线管内通道直径约为 2 mm,从图 1 可以看出,在磁场约束下,大部分质量较轻的离子可以通过螺线管离子输运通道到达靶极,而质量较重的离子则更多地损失在通道内,由此可以大幅提升有效氢离子成分比例。

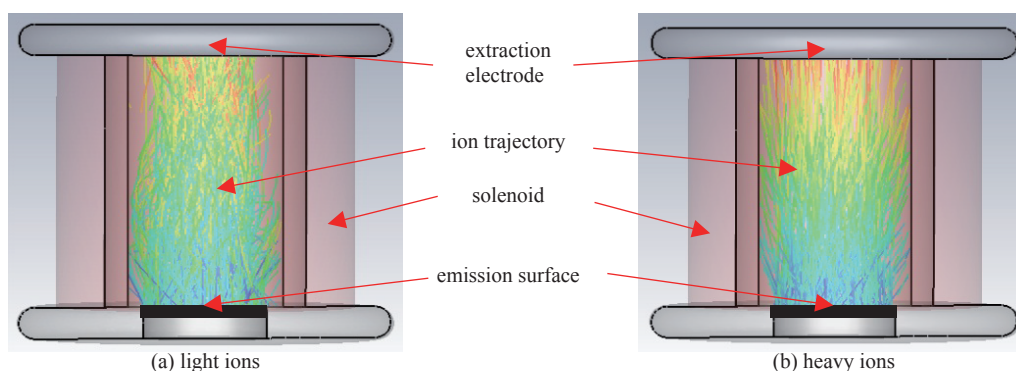


Fig. 1 Trajectory of light and heavy ions in the axial magnetic field of solenoid

图 1 轻、重离子在螺线管轴向磁场中的运动轨迹

### 1.2 磁场调控型离子源的初步设计

磁场调控型离子源采用含触发极、阴极、阳极的三电极结构。磁场调控型离子源工作原理如图 2 所示,离子源阴阳极之间加载脉冲高压,触发极连接触发电阻到阳极,离子源触发电极首先与阴极发生击穿放电产生初始种子带电粒子,并迅速扩散至阴阳极之间,使得离子源阴阳极导通形成脉冲真空弧放电等离子体<sup>[12]</sup>,等离子体从阴极区域产生并向外膨胀。将螺线管线圈接在阴阳极放电回路之中,当阴阳极之间导通放电时,脉冲电流通过螺线管在离子源轴向区域产生脉冲磁场,其中脉冲宽度为数微秒量级。通过螺线管的理论设计分析,最终设计螺线管内径 3.25 mm,长度 8 mm,采用绕 3 层制,丝径 0.5 mm,螺线管厚度为 1.5 mm,设计螺线管孔径

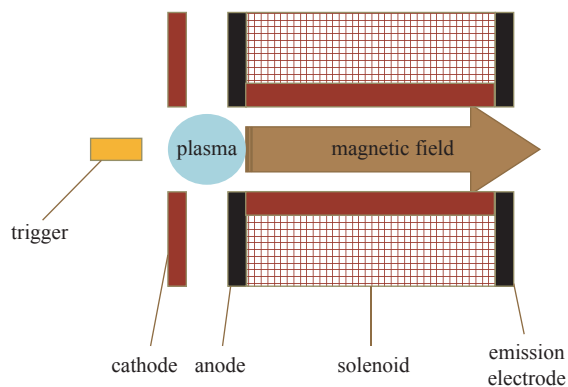


Fig. 2 Principle diagram of magnetic field regulating ion source

图 2 磁场调控型离子源工作原理图

约为 2 mm。流过螺线管线圈脉冲电流 100 A 时，轴向磁场约为 0.7 T。采用 CST 仿真软件进一步计算螺线管磁场分布，图 3 为螺线管磁感应强度分布及其轴线上的磁场分布曲线。

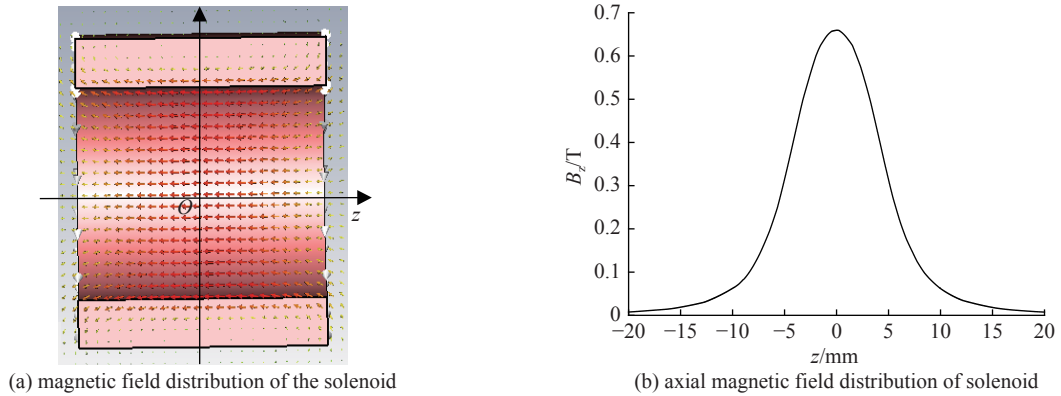


Fig.3 Magnetic field distribution of solenoid

图 3 螺线管磁场分布情况

图 4 中采用 CST 仿真软件模拟了离子源引出氢、金属离子束流轨迹，其中加速场电压为 100 kV，可以看出，离子源中氢离子沿磁力线螺旋运动通过轴向磁场区域，在加速场作用下到达靶面，大部分金属离子在磁场通道中损失。从图 4 中的束流轨迹还可以看出，磁场仅在螺线管轴线区域，当离子束离开螺线管区域后由于磁场发散并逐渐减弱，离子束发散，在加速空间不发生碰壁损失的情况下，对于降低靶面功率密度是有利的。

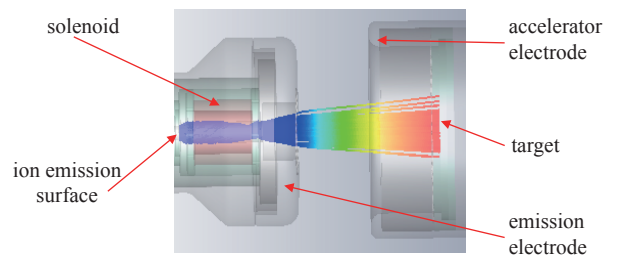


Fig. 4 Structure and simulation design of magnetic field regulating ion source

图 4 磁场调控型离子源结构及仿真设计

## 2 实验装置

在理论分析的基础上，设计了磁场调控型离子源，开展了束流打靶离子流、打靶束斑形貌以及集成出中子初步实验研究。束斑形貌测试采用闪烁体加 CCD 相机的测量方法。离子束加速电场作用下轰击闪烁体表面，闪烁体发光，通过 CCD 相机收集闪烁体发光信号，发光光斑即为打靶离子流束斑，束斑测量方法已在此前的研究中建立<sup>[13-14]</sup>。离子加速打靶能量为 100 keV，研究有无磁场以及不同工作电流条件下束斑变化规律。束流打靶离子流包含内靶电流和外筒电流，内靶电流为轰击到靶面的离子电流，外筒电流为发散的离子束轰击到加速电极上形成的电流，内靶位于外筒内部，构成类似于法拉第筒的结构，内靶和外筒电流测量均采用美国 Person 公司 2878 型号电流探头测量，其测量脉冲电流幅值最大可达 400 A，测量上升沿为 5 ns，满足束流打靶离子流的测量要求。内靶和外筒电流的大小反映束流的聚散情况，离子流测量实验原理如图 5 所示。对于引出离子束中有效离子成分的测量和分析，采用氢同位素氘来研究，通过氘核反应产生中子实验，测量中子产额，从而反推打靶离子流中氘离子的含量，出中子实验在中子实验平台上开展。

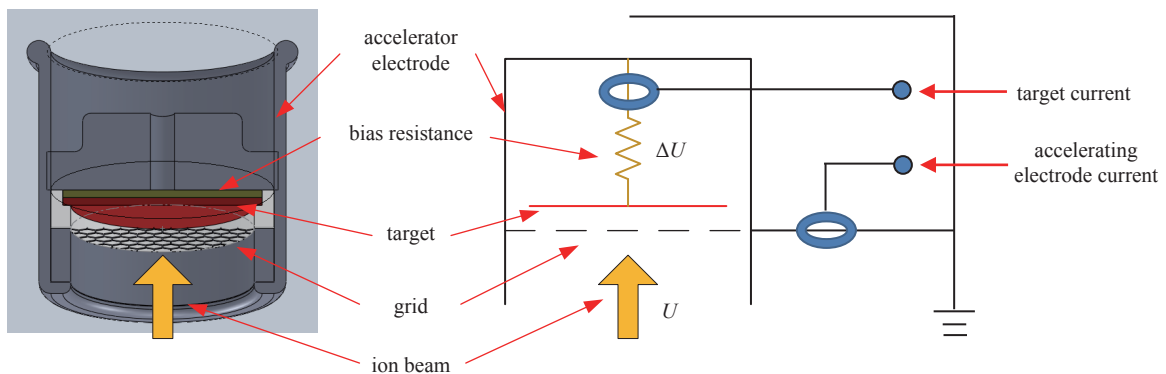


Fig. 5 Experimental principle diagram for ion beam measurement

图 5 离子流测量实验原理图

### 3 磁场调控型离子源实验研究

#### 3.1 束斑测量结果与分析

图6为引出电压100 kV、弧流52 A条件下的引出束斑形貌,图6(a)为有磁场条件下的束斑测试结果,图6(b)为无磁场条件下束斑测量结果。可以看出有磁场条件下束斑较大,这是由于吸氢材料作为阴极材料时,放电过程中将产生大量的氢原子和氢离子,在磁场作用下,潘宁效应引起氢原子进一步电离使得氢离子增多,氢离子在磁场作用下约束在螺线管通道中,当氢离子被引出电场拉出螺线管磁场区域后,将失去约束作用散开形成发散束,产生较大束斑。当没有磁场作用时,由于细长的螺线管通道使得等离子体在扩散过程中大部分离子将碰壁损失,少量扩散进入加速空间,离子源发射面附近将由于低密度等离子体形成凹面形状,在外加引出电场的作用下形成聚焦离子束,形成较小的束斑。

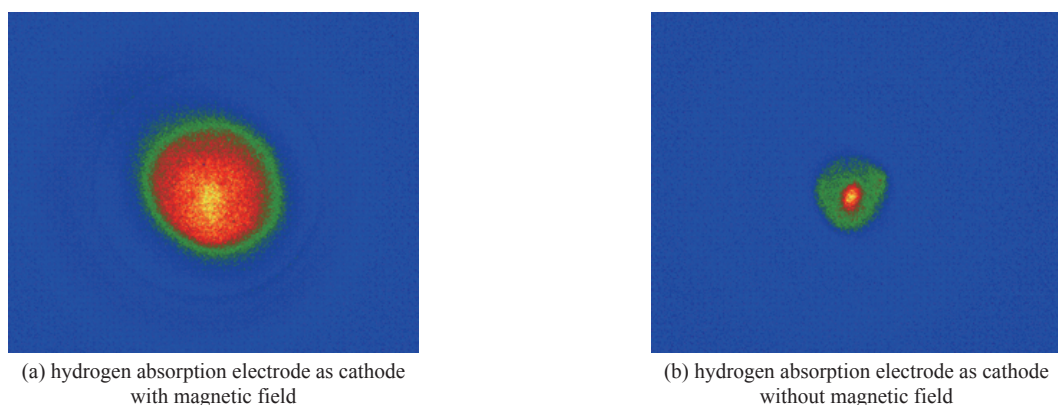


Fig. 6 Beam profile of different discharge status at 52 A arc current

图6 弧流52 A时不同放电状态下束斑形貌

图7为磁场调控型离子源引出电压100 kV时,不同弧流条件离子打靶束斑形貌。当弧流从52 A增大到89 A,束斑逐渐增大。磁场调控型离子源在弧流增大后,束斑呈现显著的膨胀过程。这是由于弧流增大,使得离子源等离子体密度增大,引出离子流强增大使得空间电荷力增强,从而导致束流发散。因此弧流越大,束斑发散越厉害。

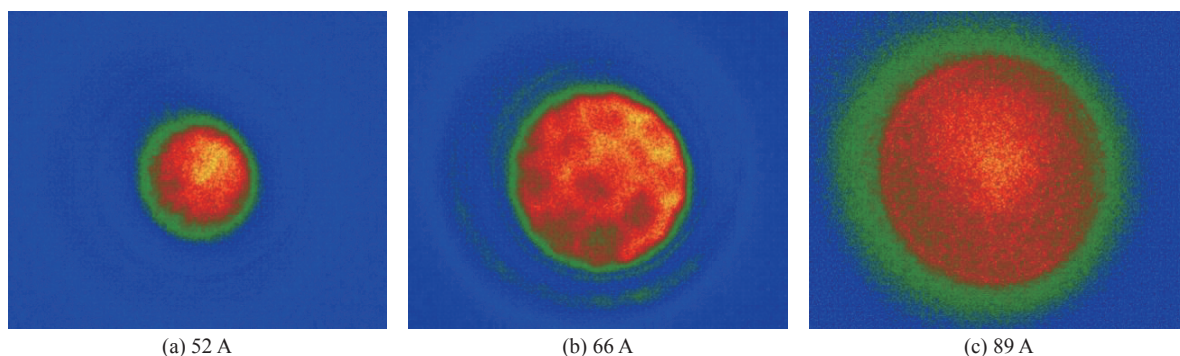


Fig. 7 Beam profile of different arc current

图7 不同弧流引出离子流打靶束斑情况

#### 3.2 引出离子流测量结果与分析

对磁场调控型离子源引出离子流强进行测量,测量内外靶筒离子流强如表1所示。当弧流流强较小时,离子源中等离子体发射面处密度较低,加速场的聚焦力对引出离子束有效聚焦,弧流66 A时加速电极上的外筒电流仅为0.1 A;随着弧流增大,作为加速电极的外筒电流显著增大,这是由于弧流增大后,等离子体发射处密度大大增加,使得等离子体发射面逐渐外凸,引出后的离子由于磁场约束作用消失且具有较强的空间电荷力,导致引出束流显著膨胀发散,从而大量离子被外筒收集,因此加速电极上的外筒电流迅速增大,这与图6中随着弧流增大束斑逐渐增大的实验测量结果相一致。通常,离子束轰击材料表面还将产生二次电子发射,二次电子发射系数因离子种类、能量和被轰击材料性质而定,一般二次电子流强达入射离子流强的10倍以上,轰击加速电极产生的二次电子得不到抑制,因此加速电极的电流显著增大,当弧流150 A时,加速电极上的外筒电流达到了10.0 A。表1中还可

表 1 磁场调控型离子源引出离子流  
Table 1 Extracting ion current of magnetic field regulating ion source

extracting voltage/kV	arc current/A	target current/mA	accelerating electrode current/A
110	66	280	0.1
110	102	310	1.0
110	150	360	10.0

以看出,随着弧流增大,等离子体密度的增加,也将导致内靶电流逐渐增大。

### 3.3 氢同位素核反应出中子实验结果与分析

当弧流 100 A、加速电压 110 kV,加速氘离子轰击氘靶,通过氘氘聚变核反应产生中子。磁场调控型离子源有螺线管时,中子产额约  $5 \times 10^4$  n/p,靶电流约为 300 mA。保持离子源结构不变,去掉螺线管磁场后,几乎没有中子产生。螺线管轴向磁场对氢同位素离子有较强的约束作用,从而引出氢离子流,无磁场时,氢离子大量损失在扩散通道中。测量结果显示,中子产额波动小于 6%,采用磁场调控的真空弧离子源可以有效降低真空起弧过程带来的随机波动。利用中子产额测量结果通过核反应界面数据反推打靶离子流中有效氘离子流强可知,通过引入磁场的磁场调制型离子源设计,引出单原子氘离子比例有了大幅的提升,从原来的 20% 提升至 45%。

## 4 结 论

通过理论分析和仿真模拟给出了磁场调控型离子源的工作机制,研制了磁场调控型真空弧离子源,提高真空弧放电离子源有效离子成分比例及其稳定性。实验研究了磁场调控型离子源的工作特性,结果表明,磁场调控型离子源强轴向磁场对等离子体膨胀、电离过程起重要影响,实现了对混合离子成分等离子体的筛选作用,从而提高引出离子流强中的有效离子成分比例。

下一步将对对比研究吸氢材料阴极和阳极的打靶离子流强和波形,深入研究轻离子的磁场调控作用对打靶离子流强的影响规律,采用采样磁分析的方法测量离子源出口处单原子氢离子比例。通过对磁场强度、磁场通道孔径、通道长度、扩散空间尺寸等关键参数的优化设计和实验研究,进而获得更高有效离子成分比例的强流脉冲束流。

### 参考文献:

- [1] Nikolaev A G, Oks E M, Savkin K P, et al. Upgraded vacuum arc ion source for metal ion implantation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 02A501.
- [2] MacGill R A, Dickinson M R, Brown I G. Vacuum arc ion sources-Micro to macro[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1996, 67(3): 1210-1212.
- [3] Dougherty R C, Rochau G E, Bickes R W Jr, et al. Neutron generator for two-phase flow calibration: annual progress report[R]. SAND-78-2030, 1978.
- [4] Rochau G E, Hornsby D R, Mareda J F, et al. A pulsed neutron generator for mass flow measurement using the pulsed neutron activation technique[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1981, 28(2): 1658-1660.
- [5] Shope L A, Berg R S, O'Neal M L, et al. Operation and life of the zetatron: a small neutron generator for borehole logging[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1981, 28(2): 1696-1699.
- [6] 董攀, 李杰, 郑乐, 等. 真空弧放电 TiH 合金阴极表面形貌分析[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 014001. (Dong Pan, Li Jie, Zheng Le, et al. Surface morphology analysis of TiH cathode in vacuum arc discharge[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 014001)
- [7] Ehlers K W, Gow J D, Ruby L, et al. Development of an occluded-gas ion source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1958, 29(7): 614-619.
- [8] Bitulev A A, Churin S V, Shchitov N N, et al. Increasing the efficiency of ion sources of vacuum neutron tubes[J]. *Atomic Energy*, 2015, 118(5): 354-359.
- [9] Oks E M, Brown I G, Dickinson M R, et al. Elevated ion charge states in vacuum arc plasmas in a magnetic field[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(2): 200-202.
- [10] Frolova V P, Nikolaev A G, Oks E M, et al. Deuterium ions in vacuum arc plasma with composite gas-saturated zirconium cathode in a magnetic field[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28: 075015.
- [11] Walko R J, Rochau G E. A high output neutron tube using an occluded gas ion source[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1981, 28(2): 1531-1534.
- [12] Lan Chaohui, Long Jidong, Zheng Le, et al. Characteristics of resistance triggering of a pulsed vacuum arc ion source[J]. *Chinese Physics Letter*, 2015, 32: 095201.
- [13] Yang Zhen, Long Jidong, Wang Xiaohu, et al. Ion beam profile diagnostic methods for vacuum arc ion source in sealed-tube neutron generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(6): 2070-2074.
- [14] 杨振, 龙继东, 蓝朝晖, 等. 离子束流剖面分布离线诊断方法探索[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 044001. (Yang Zhen, Long Jidong, Lan Chaohui, et al. Exploratory research on off-line diagnosis method of ion beam profile[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 044001)