

文章编号: 2095-4980(2021)02-0334-04

小型脉冲中子发生器用真空弧离子源研制

董攀¹, 蓝朝晖¹, 郑乐², 李杰¹, 王韬¹, 杨振³, 龙继东¹

(1.中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999; 2.四川新网银行股份有限公司, 四川 成都 610000;
3.中山大学 中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 真空弧离子源以其结构简单、空间紧凑、氘离子流强大等优点, 非常适合在小型脉冲中子发生器中使用。本文介绍了一款小型真空弧离子源, 它利用氘化钛阴极同时作为氘气源和电极, 避免了复杂的气路管道。该离子源外径约 20 mm, 长 25 mm。采用电荷耦合器件(CCD)相机拍摄了该离子源放电光斑, 发现弧流越大, 光斑越大。采用偏压平板测量了该离子源的饱和离子流, 当弧流大于 100 A 时, 饱和离子流可达 1 A 以上。采用磁分析测量了等离子体中氘离子比例, 结果表明氘离子比例随弧流增加而增加, 最大约为 27%。最后测量了该离子源在 120 kV 高压下打氘靶的中子产额, 当弧流为 100 A, 脉宽为 5 μ s 时, 中子产额约 1×10^5 n。该源可应用在小型脉冲中子发生器中。

关键词: 脉冲中子发生器; 真空弧放电; 离子源

中图分类号: TN784; O461.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019448

Vacuum arc ion source used in small pulsed neutron generator

DONG Pan¹, LAN Zhaohui¹, ZHENG Le², LI Jie¹, WANG Tao¹, YANG Zhen³, LONG Jidong¹

(1.Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China; 2.Sichuan XWBank, Chengdu Sichuan 610000, China; 3.Institut Franco-chinois de l'Energie Nucléaire, Sun Yat-sen University, Zhuhai Guangdong 519082, China)

Abstract: Vacuum arc ion source is suitable for miniaturized pulse neutron generator because of its simple structure and high deuterium ion density. A small vacuum arc ion source is developed with the diameter of 20 mm and the length of 25 mm. TiD works both as the cathode and as deuterium source, which avoids using the complicated gas pipes. The light spots caused by the ion source are measured by a Charge Coupled Device(CCD) camera. It is found that the larger the arc current, the brighter the spots. The saturated ion current is measured by a biased plate. When the arc current is larger than 100 A, the saturated ion current could be above 1 A. The deuterium ion ratio in the plasma is measured by a simple magnetic analysis. The ratios grow with the arc current, and the maximum is about 27%. When the arc current is 100 A and the pulse duration is 5 μ s, the neutron yield is about 1×10^5 n for the TiD target under 120 kV voltage. The source can be used in small pulsed neutron generators suitably.

Keywords: pulsed neutron generator; vacuum arc discharge; ion source

中子源一般有反应堆、天然放射性材料和中子发生器 3 种, 其中中子发生器具有体积小、产额高、发射可控等优点, 在材料识别、抗核加固、中子照相等领域具有广泛用途^[1]。中子发生器的基本原理是离子源产生氘离子, 然后高压引出加速后打氘或氘靶, 产生中子。中子发生器在脉冲环境下使用时, 为了满足高产额, 需要离子源提供的氘离子密度较高, 通常采用电子回旋共振(Electron Cyclotron Resonance, ECR)、高频、射频电感耦合(Induced Coupled Plasma, ICP)等电离效率较高的离子源。目前脉冲中子发生器发展趋势是小型化和可移动性, 而上述离子源对空间要求高, 制约了整体结构的小型化。所以, 结构紧凑的真空弧离子源受到越来越多的青睐。如在体积要求极高的石油探井中子管中, 真空弧离子源占有重要地位^[2]。

收稿日期: 2019-11-06; 修回日期: 2020-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11705181; 11975217)

作者简介: 董攀(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为真空弧离子源。email:panner95@163.com

1 真空弧离子源结构

真空弧离子源工作在真空环境中，以阴极材料原子蒸发后电离形成的等离子体为导电介质^[3]。它的电子发射密度非常高，约 10^9 A/cm²，可将放电点附近大量阴极材料蒸发并电离。由于沉积功率密度高，金属蒸汽的电离率非常高，接近 100%。所以真空弧离子源等离子体密度高，可提供安培量级的离子束流。如果阴极为含氙材料，即可提供大流强氙离子流^[4]。真空弧离子源的结构极为简单，用两个片状电极即可构成。此外，它的氙气由电极提供，不需要额外的气路补充氙气。所以，真空弧离子源非常适合用在小型脉冲中子发生器中^[5]。为此，研制了一台用于小型脉冲中子发生器的真空弧离子源，如图 1 所示。

研制的真空弧离子源主要由阴阳极、触发绝缘、扩张杯和栅网等零件组成，整体结构非常简单。阴极材料为 TiD，阳极为不锈钢，它们之间的绝缘片为耐烧蚀的可加工陶瓷。阴阳极放电通过绝缘材料沿面闪络触发，所以绝缘片厚度仅 0.5 mm。阴阳极间放电产生极高密度的等离子体，膨胀进入扩张杯，然后被高压引出成为束流。扩张杯引出口有一张栅网，作用是屏蔽高压引出电场对离子源的影响。离子源实物外径约 20 mm，长 25 mm。

2 真空弧离子源性质

2.1 放电光斑

采用 CCD 相机拍摄了不同放电弧流下真空弧放电光斑形状，如图 2 所示。CCD 相机和放电之间的时序由同步延时机(DG645)控制，CCD 相机曝光时间远长于整个放电脉宽，可将放电发出的所有光线全部收集。从图 2 可以看出，所有阴极斑汇聚在一起，形成了一个光斑。放电弧流越大，光斑越大。这是因为单个阴极斑最大只能发射 10 A 左右的电子，当弧流大于单个阴极斑发射电流后，阴极表面同时存在多个阴极斑。电流越大，阴极斑数量越多，发射面积越大，等离子体在径向上分布越广，从而光斑越大。而且等离子体叠加在一起，密度增加，光斑亮度也相应增加。

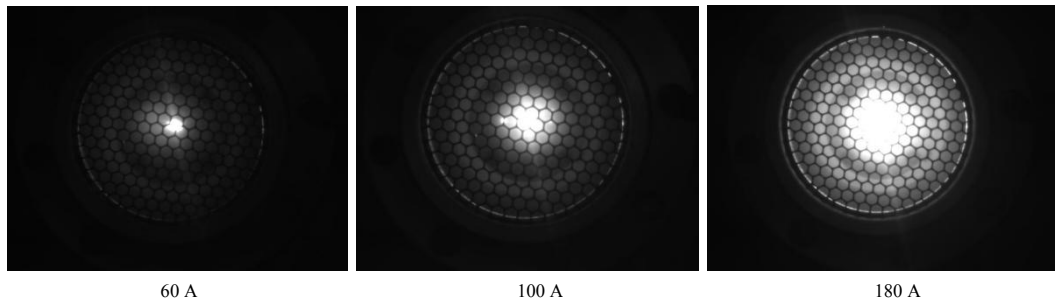
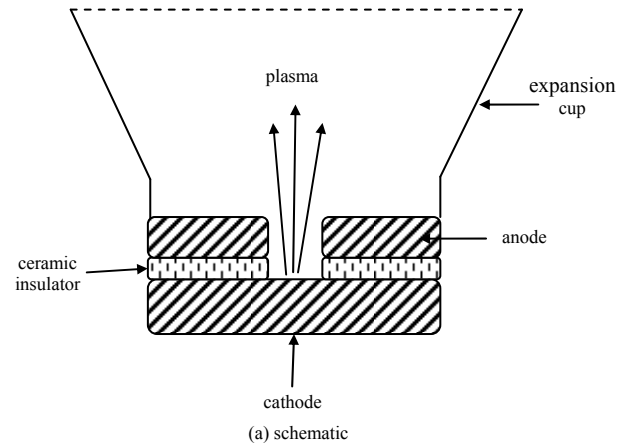


Fig.2 Bright spots under different arc currents
图 2 不同弧流下放电光斑

2.2 饱和离子流

饱和离子流可以表征离子源所能提供的最大离子流强，和离子源内等离子体密度密切相关。利用图 3(a)所示的测量装置测量了研制的真空弧离子源饱和离子流，结果如图 3(b)所示。

在距离离子源引出口 20 mm 的地方放置一块离子信号收集板，它相对离子源阳极有 50 V 的负压，起排斥电子、收集离子信号的作用。真空弧平均电子温度约为 3 eV，所以 -50 V 的偏压可以将电子信号全部抑制。



(b) photo

Fig.1 Schematic and photo of ion source
图 1 离子源示意图及实物照片

低压下离子轰击收集板产生的二次电子信号可以忽略。膨胀到收集板前的等离子体受偏压作用形成 Child 鞘层, 此时可认为收集板上收集电流为源限制流, 测量信号即为饱和离子流, 主要由等离子体密度和温度决定。从图 3(b)可知, 随着弧流增加, 饱和离子流不断增加。这是因为弧流越大, 阴极斑数量越多, 等离子体密度也越高。而等离子体温度变化不大, 所以等离子体密度增加后, 收集板上采集的离子信号增强。放电电流为 100 A 时, 可提供大于 1 A 的离子流。

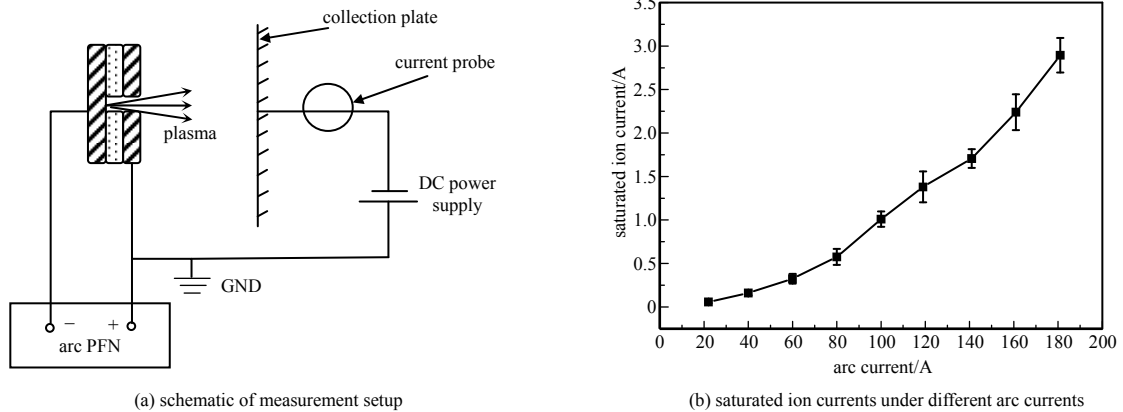


Fig.3 Saturated ion currents of the ion source
图 3 离子源饱和离子流

2.3 氘离子比例

尽管真空弧离子源提供的离子流强很大, 但等离子体中混有大量金属离子, 它们加速打靶不能产生中子, 是无效离子。这些金属离子不仅增加高压电源负载, 而且增大束流包络, 容易引起高压击穿。另外, 金属离子溅射能力强, 长时间打靶会对靶造成损坏, 严重制约中子发生器寿命。为了了解离子源中有用的氘离子比例, 搭建了一套简易的磁分析装置, 测量了不同弧流下氘离子比例。简易磁分析装置如图 4(a)所示, 它主要包含引出、偏转和采集三部分。离子源内离子先被平板电极引出, 然后经狭缝准直进入二级磁铁后, 在磁场作用下发生偏转, 由于不同荷质比离子偏转半径不同, 从而可以将它们在空间上分离, 最后不同离子信号被法拉第杯收集。法拉第杯离二级磁铁距离非常近, 利用磁铁边缘场抑制离子打靶产生的二次电子。等离子体中主要包含 H^+ 、 D^+ 、 Ti^+ 、 Ti^{2+} 和 Ti^{3+} 等离子, 其中 H 离子来自阴极表面吸附的水汽, D 和 Ti 离子来自阴极。磁分析装置磁铁为长方形, 宽仅 50 mm, 离子分离距离不够, 分辨率较小, 不能区分钛离子的不同价态, 只能将不同价态的钛离子当作一种信号处理。关于磁分析装置的详细介绍可参考文献[6]。氘离子比例随弧流的变化关系如图 4(b)所示, 放电弧流小于 40 A 时, 氘离子比例低于 20%, 等离子体中含有大量金属离子; 放电弧流大于 40 A 时, 氘离子比例增加到 25%以上, 但增加趋势减缓, 最高比例约 27%。当放电弧流较小时, 增加弧流可以提高氘气的释放, 氘离子比例会增加^[7]。但当放电弧流增加到一定程度后, 增加弧流会提升放电斑温度, 增加金属蒸汽的挥发, 从而引入大量的金属蒸汽, 而金属原子电离能远小于氘原子, 所以弧流增大时多馈入的功率大部分要被金属原子蒸发和电离过程消耗掉, 氘离子比例增加缓慢。目前该源氘离子比例相对较低, 大部分束流并不能产生中子。提高氘离子比例是该离子源下一步需要改进的方向。

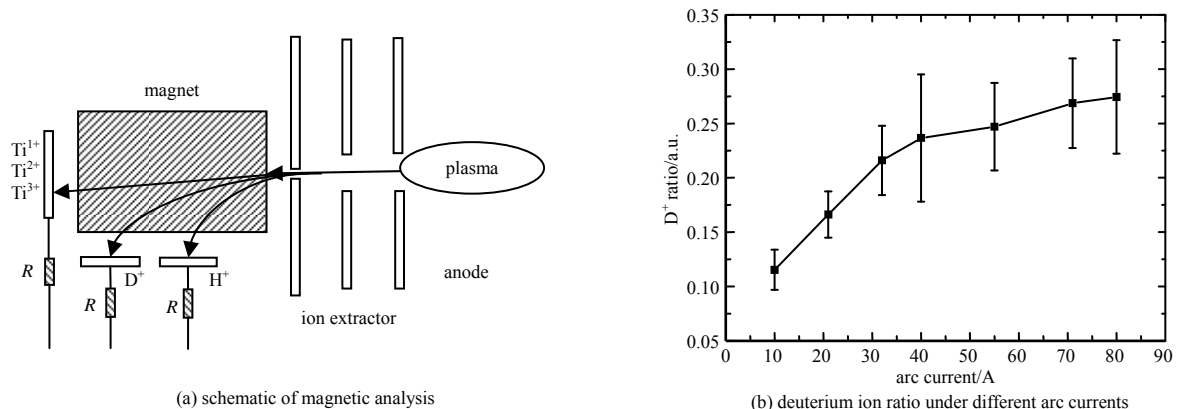


Fig.4 Magnetic analysis setup and deuterium ion ratio
图 4 磁分析装置和氘离子比例

2.4 中子产额

为了了解离子源引出氘离子流强,测量了该离子源打靶产生的中子产额。测量时,通过引出极将离子源内等离子体引出、聚焦和加速后打靶。靶为 Mo 基底上的含氘钛膜,氘钛原子比为 1.6。离子源和靶之间的加速电压为 120 kV。离子源脉宽为 5 μs 和弧流为 100 A 时,单次工作中子产额为 1×10^5 n。

3 结论

研制了一款用于小型中子发生器的真空弧离子源,外径约 20 mm,长约 25 mm。采用多种测试方法对其性能进行了测量,结果表明该离子源饱和离子流大于 1 A,氘离子比例最高约 27%,中子产额可达到 1×10^5 n。综合而言,该离子源体积小,可提供氘离子流强大,中子产额高,可应用在小型脉冲中子发生器中。但同时离子源提供的氘离子比例偏低,还需要继续优化。

参考文献:

- [1] 齐超,杨善潮,刘岩,等. 商用 CMOS 工艺 SRAM 脉冲中子辐射效应实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5): 800-804. (QI Chao,YANG Shanchao,LIU Yan,et al. Experimental investigations on pulsed neutron radiation effect on commercial CMOS SRAMs[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5): 800-804.)
- [2] CHERNIKOVA D,ROMODANOV V L,BELEVITIN A G,et al. Experimental and numerical investigations of radiation characteristics of Russian portable/compact pulsed neutron generators:ING-031,ING-07,ING-06 and ING-10-20-120[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2014(746):74-86.
- [3] BROWN I G,OKS E M. Vacuum arc ion sources—a brief historical review[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(6):1222-1228.
- [4] CHEN Lei,JIN Dazhi,CHENG Liang,et al. Ion charge state distribution and ion velocities in the titanium hydride cathodic vacuum arc plasmas[J]. Vacuum, 2012,86(7):813-816.
- [5] YANG Z,LONG J,WANG X,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.
- [6] 郑乐,龙继东,董攀,等. 基于磁偏转的真空弧离子源成分诊断[J]. 核技术, 2016,39(9):090204-1-090204-5. (ZHENG Le,LONG Jidong,DONG Pan,et al. Study on ion species of vacuum arc ion source with analysis of magnetic[J]. Nuclear Techniques, 2016,39(9):090204-1-090204-5.)
- [7] LIU Feixiang,LONG Jidong,ZHENG Le,et al. Experimental study and modeling of the deuterium releasing quantity in a pulsed vacuum arc discharge with a metal deuteride cathode[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2017,50(13):135205-1-135205-7.