

300 keV, 30 mA 氘粒子加速器

苏桐龄 孙别和 杨保太 朴禹伯 水永清 陈克凡 王学智
杨成 牛占岐 刘延统 潘民生 洪忠梯 陈勤

(兰州大学原子核研究所)

这是一台低能强流加速器。调试结果:靶上获得能量 300 keV, 流强 30 mA 的连续氘束流;束斑直径小于 2 cm。通过(d, T)反应中子产额达到 3×10^{12} n/s。该器采用双等离子体离子源, 双间隙高梯度加速管, 由频率为 2.5 kHz 的可控硅中频逆变器供电的对称型四级倍压稳压电源, 直径 20 cm 和转速 1100 r/min 的高速旋转氘靶等。

关键词 低能强流加速器, 强流中子发生器。

一、引言

用低能加速器通过 $T(d, n)^4He$ 反应产生 14 MeV 中子的中子发生器在核科学研究中有长久且重要的使用历史, 并得到广泛的应用。近十几年来, 由于核聚变反应堆材料研究及快中子治疗癌症研究等需要, 它向强流发展。兰州大学最近建成了一台 3×10^{12} n/s 强流中子发生器, 标志着我国已进入世界中子发生器先进国家之列。目前利用该器已初步开展了一些小截面和长寿命核素活化截面的测量、半导体器件中子辐照损伤研究工作。现正在开展裂变-裂变混合堆结构材料的中子辐照损伤等研究工作。

这台中子发生器是在兰州大学先后研制的中子产额分别为 10^{10} n/s 和 10^{11} n/s 量级的二台中子发生器^[1,2]的基础上发展起来的。采用双等离子体离子源, 双间隙高梯度加速管和磁三单元四极透镜, 2.5 kHz 中频供电的对称型倍压高压稳压电源等。中子产生采用高速旋转氘靶吸收靶, 靶直径 20 cm, 转速 1100 r/min。此外, 在真空系统气体排出口还装有除氘净化装置。本文主要对加速器各主要部分原理、结构及试验结果作简要介绍。

二、各主要部分简介

主机呈卧式。束轴离地标 1.8 m, 长(高压屏蔽电极至磁三单元四极透镜) 4m, 宽 1.2m, 最大高度 2.4 m。主机底盘下装有四个小轮, 可在室内移动。整机结构示于图 1。满载运行时总电功率约 40 kW。

1. 双等离子体离子源

双等离子体离子源结构如图 2 所示。中间电极和阳极用中碳钢材料, 用循环流动的变压器油冷却。阳极嵌块用钨材料, 引出孔直径 1 mm。采用旁热式六硼化镧阴极。磁场线圈为 6000 安匝, 在 5000 安匝时, 在中间电极和阳极之间可产生 0.5 T 的最大磁场强度。引出结构采用扩散杯, 其优点是: 扩大离子发射面, 获得较大束流; 改善离子发射面上发射流密度的均匀性; 借助于引出电极和扩散杯之间形成的静电场, 建立平面状或微凹状等离子体发射面, 给出较优越的离子光学性能。扩散杯的磁性能、电势和几何形状均会影响到离子束的品

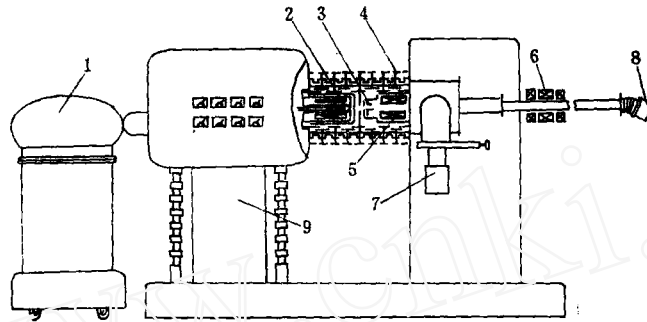


图 1 加速器结构示意图

Fig. 1 Scheme of the accelerator

1——高压电源；2——双等离子源；3——次级电子抑制电极；4——加速管；5——空间电荷透镜；6——磁三单元四极透镜；7——涡轮分子泵；8——旋转靶；9——隔离变压器。

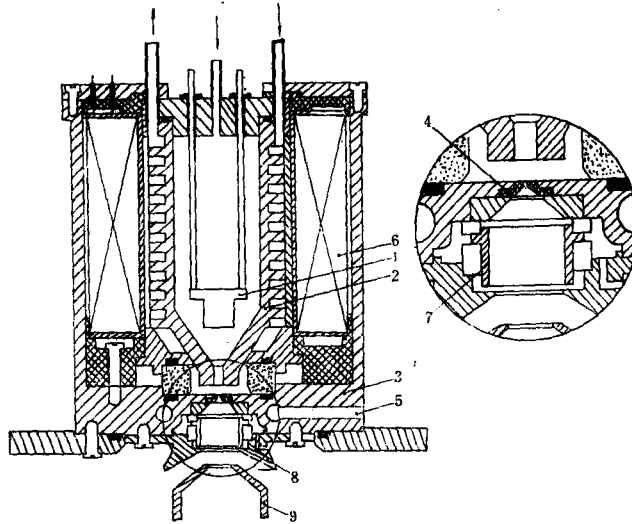


图 2 双等离子体离子源结构图

Fig. 2 Duoplasmatron scheme

1——阴极；2——中间电极；3——阳极；4——阳极嵌块；5——导油管；6——线圈；7——扩散杯；8——屏蔽电极；9——引出电极。

质和光学性能^[3]。本源扩散杯材料用低碳钢,处于悬浮电位,并在杯口加与阳极同电位的屏蔽电极,以嵌定离子发射面电位。离子源由一台频率为 2.5 kHz 的可控硅中频逆变器供电。三组隔离变压器将中频电从地电位端输送到高电位端。离子源总功耗不超过 3 kW。

使用结果:在弧流(5—8)A、引出电压(15—17)kV时,可引出(35—45)mA 的氙束流。单原子离子比未测量。氙气耗量约(100—200)×101.3 ml·kPa/h。离子源中最易损坏的是阴极。本源阴极的寿命在 500 h 以上,其损坏多由不慎造成的机械损伤所致。

2. 束流加速和传输系统

离子源引出系统、双间隙高梯度加速管、一组空间电荷透镜和一组三单元磁四极透镜形成加速或聚焦场。在强流束传输中,空间电荷效应和杂散离子的存在是不可忽略的,在低能

区尤为严重,因此尽可能地缩短低能传输距离是有益的。本器采用混合束,未进行前分析。本器采用了如图3所示的紧凑的引出-加速系统。加速管为双间隙三电极结构。中间电极为膜片式,孔径6 cm,高压电极和地电极分别从两端伸入到加速管中间电极附近,孔径分别为2和6 cm。离子源和一组空间电荷透镜分别安装在高压电极和地电极内。高压电极兼作离子源引出和初聚焦电极。这个系统的特点是基本无低能漂移区。只是根据离子光路匹配的需要,在引出区和加速场之间设置了一段很短(约2cm)的漂移区。地电极后1.5 m处置有一组三单元磁四极透镜作为后聚系统。加速管采用大气型,长88 cm。绝缘环分为8级,加速间隙中平均电位梯度约40 kV/cm,绝缘环在空气中的沿面平均电位梯度小于5 kV/cm,内表面却用金属电极作了不透光屏蔽,以防杂散离子和次级电子的轰击。

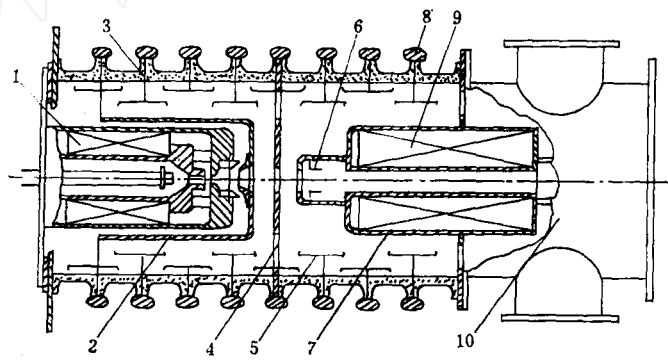


图3 加速管结构示意图

Fig. 3 Accelerating tube scheme

- 1——离子源; 2——引出电极; 3——绝缘环; 4——中间电极; 5——屏蔽电极; 6——次级电子抑制电极; 7——地电极; 8——分压环; 9——空间电荷透镜; 10——四通。

实验表明,引出电极兼作高压电极的情况下,电极边缘场效应比较明显,流强增加时尤为严重。而且加速场和引出区电场的耦合,使加速器调试比较困难。我们在引出区和加速场之间,设置了一段约2 cm长的漂移区,不仅使两边电场隔离,而且使束流从引出区进入加速区时能达到较好的匹配。

实验还发现,在原设计的次级电子抑制电极和磁透镜区内,由于少量的边缘束打在磁透镜内壁产生次级电子,只要采用合适的几何形状和由电场和磁场形成的电子捕获区,能使该区电子密度增高,以致形成径向聚焦电场。本器已用这种空间电荷透镜型的聚焦单元代替原设计的磁透镜。

3. 直流高压稳压电源

直流高压电源的额定指标为:工作电压300 kV,输出电流50 mA。采用如图4所示的对称型四级倍压电路。为了保证一定的负载特性而又不致因整流滤波电容的容量过大,随之储能过多而使电源不易保护,希望供电电源频率越高越好。但高压大功率中频变压器在频率上受到限制。根据经验,选定为2.5 kHz,在此频率下,变压器较易于制作,且功耗仍较小^[4]。

作为加速器电源,最经常、严重的过电压或过电流现象发生在加速管被击穿时,此时在升压变压器次级线圈和整流器内分别产生过电压和过电流。通常所用的保护办法是在升压

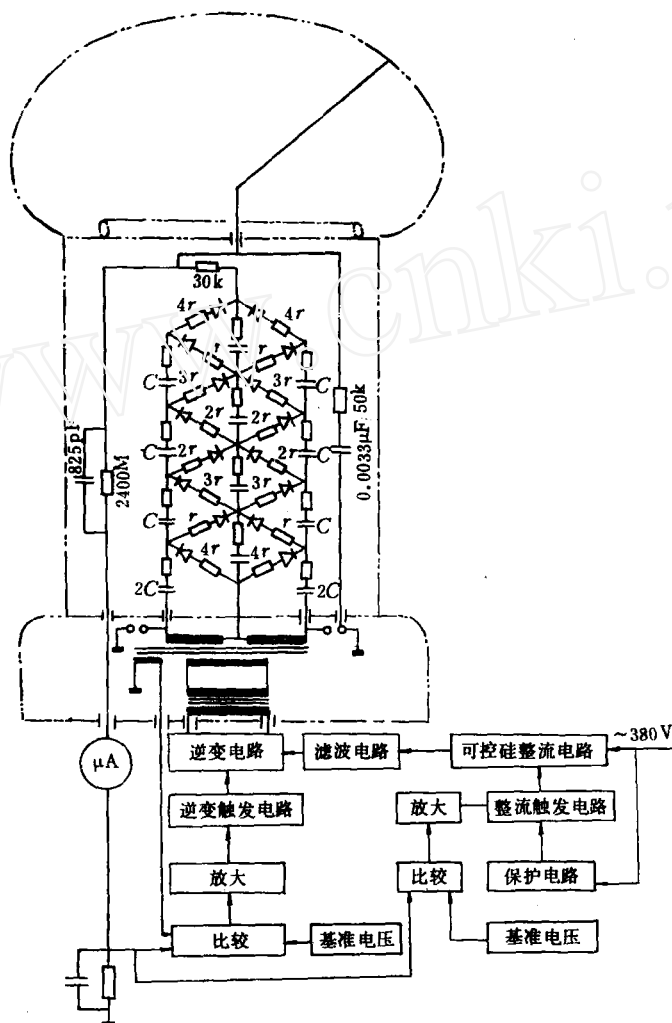


图 4 直流高压电源原理图

Fig. 4 Block diagram of H. V. supply

$C=0.042\mu\text{F}$; $r=1\text{k}\Omega$.

变压器次级端并联快速保护球隙并在直流输出端串联“保护电阻”抑制放电速率。实验表明^[5]，按通常接法，倍压电路短路过渡过程中流经各整流器的浪涌电流的分布极不均匀。储存在电荷传输柱中的能量中的大部分通过位置在最上和最下二端的两对整流器释放出去。我们按理论计算在各电容器和整流器上串接了不同限阻的限流电阻，使各整流器上浪涌电流的功耗较为平均，从而在较小的电阻下实现了可靠的保护。

一台频率为 2.5 kHz、功率为 30 kW 的可控硅中频逆变器给高压电源供电。采样电压分二路，分别比较放大后输入到整流触发电路和逆变触发电路。前者调整直流电压，后者通过改变主回路移相再调整中频输出电压，二者共同达到稳定高压输出电压的目的。高压输出电压在 0 至 360 kV 连续可调，在 150 kV 至 360 kV 连续稳压。考虑到中子发生器将来可能脉冲化对电源提出快稳压的要求，用一个电压切分器作高压采样和测量系统，并预加了一个供快稳压用的滤波器。中频电源具有零位、限压及过流保护功能。

倍压塔、保护电阻、电压切分器、滤波器及外罩的 8 个均压环等被安装在一个内径 79 cm、高约 1 m 的环氧玻璃布筒内,注入变压器油,提高绝缘能力并有利于散热。环氧筒装在一个带有四个小轮的小车上,升压变压器装在车内,整个电源可在室内自由移动。

4. 旋转靶及氚净化系统

旋转靶直径 20 cm,转速 1100 r/min。氚钛层厚度 $(0.8-4)\text{mg}/\text{cm}^2$,为一内径 6 cm、外径 19 cm 的环带,每靶含氚量 $(7.4-37)\text{T Bq}$ 。旋转密封轴采用干摩擦式一级差动真空密封轴,轴上束流通道直径 9 cm,长 4.5 cm。密封件是特制的“填 F”密封圈,转动密封泄漏率 $(1.3-13)\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。该密封轴在实验台上被运转到 1000 h 以上。

靶衬为球冠形,是由厚 1mm 的 $\text{Cu}0.1\text{Zr}$ 合金冲压成形。在其外侧平行安装一个厚 1mm 的球冠形金属挡板,将冷却水限制在靶衬与挡板之间的宽约 1 mm 的狭层中流动。样品至中子源的最近距离约 4 mm。

强流中子发生器运行中,氚的释放是不可忽略的。氚靶内 15% 的氚有可能在运行期间释放到加速器真空系统内^[6],本中子发生器每靶含氚量达 $3.7\times 10^{13}\text{Bq}$,不容许将系统内抽出的气体直接排到大气中。本器采用如下净化措施,把真空系统排出的气体送入每个容积为 1.1m^3 的两个贮气罐内,经二个串联的氧化反应器将氢的同位素变为水,可将气体中的氚浓度降低 4 个数量级。然后用鼓风稀释的办法通过高 20m 的烟囱排入大气中。烟囱入口装有氚气监测仪,当该处排放气体中的氚浓度超过最大允许值时,气体通过换向阀门自动返回到贮气罐做再次处理。氚靶贮存及操作密封手套箱亦与净化系统相连,必要时对它里面的气体亦可作类似净化处理。

真空系统用二台抽速为 1500 l/s 的涡轮分子泵抽气。通常运行时只开一台即可。

三、调 试 结 果

本器主要设计指标:氚束流能量 300 keV;流强 20 mA;靶上束斑直径不大于 2 cm;中子产额 $(1-2)\times 10^{12}\text{n/s}$;氚靶直径 15 cm,旋转靶转速 560 r/min,要求 $1\times 10^{13}\text{n/s}$ 中子产额连续工作不小于 2 h。

鉴定验收达到的实际指标:氚束流能量 300 keV;流强 30 mA;靶上束斑为约 $1.6\text{cm}\times 1.8\text{cm}$ 的椭圆;中子产额 $3.3\times 10^{12}\text{n/s}$;氚靶直径 20 cm,旋转靶转速 1100 r/min;逐渐增大氚束流强度(9 至 30 mA)补偿中子产额随时间的下降,一块含氚量 $7.6\times 10^{12}\text{Bq}$ 的靶可维持 $1\times 10^{12}\text{n/s}$ 产额 15 h 以上。

束流大小和最佳聚焦通过配合调整离子源弧流大小和引出电压高低实现。典型的运行参数是:弧流(5—8)A,引出电压(14—15)kV,靶上束流(20—30) mA。束流传输效率在(70—80%),束流越大,效率越高。

加速管空载电压可达到 360 kV 以上。系统静极环真空可达到 $3.3\times 10^{-4}\text{Pa}$,出束时四通处真空度约在 $(2.6-5.3)\times 10^{-3}\text{Pa}$ 。

计算机控制系统目前只实现了对离子源部分参数的控制,尚未实现对束流的闭环。

参加过这台中子发生器研制工作的还有:石成儒、龚成德、马树勋、张之津、王喜梅、李公平、柳纪虎、徐宁、马永利等。氚净化系统是由王齐祖、杨宏秀、马忠乾等完成的。

参 考 文 献

- [1] 兰州大学现代物理系中子发生器研制组, 兰州大学学报自然科学版, (3), 57(1978).
- [2] 兰州大学中子发生器研制组, 原子核物理, 4(1), 66(1982).
- [3] Bacon, F. M., *Rev. Sci. Instrum.*, **49**, 427(1978).
- [4] Reinhold, G. et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-22, 1289(1975).
- [5] Hara, E., *Nucl. Instrum. Methods*, **54**, 91(1967).
- [6] Booth, R. et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **145**, 25(1977).

(编辑部收到日期: 1988年7月7日)

300 keV, 30 mA DEUTERON ACCELERATOR

SU TONGLING SUN BIEHE YANG BAOTAI PIAO YUBO
SHUI YONGQING CHEN KEFAN WANG XUEZHI YANG
CHEN NIU ZHANQI LIU YANTONG PAN MINSHEN
HONG ZHONGTI CHEN QING

(Institute of Nuclear Research, Lanzhou University)

ABSTRACT

A high current low energy accelerator is described in the paper. A routine operation has given a 300 keV, 30 mA deuteron beam with spot size less than 2 cm on the target and a neutron yield of 3×10^{12} n/s through the (d,T) reaction.

A duoplasmatron ion source, a high-gradient field accelerating tube with two gaps, a 4 stage symmetrical voltage multiplier type supply stabilized and fed by a thyristor inverter power supply with frequency of 2.5 kHz, a 1100 r/min rotating target with 20 cm diameter and so on are adopted.

Key words High current low energy accelerator, Intense neutron generator.