文章编号: 1007-4627(2014) 01-0043-05

低能强流电子加速器的研制

俞成山[1, 2, 3], 李伟峰[4], 曹树春[1, 3], 李中平[1, 3], 荆晓兵[4], 石金水[4], 杨兴林[4], 张子民[1, 3], 肖荣庆[1, 3], 申晓康[1, 3], 赵全堂[1, 2, 3], 景 漪[1, 3], 宗 阳[1, 2, 3], 王燕茹[1, 2, 3]

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 甘肃省粒子束辐射工程技术研究中心, 兰州 730000;
4. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 中国科学院近代物理研究所在现有DG系列电子加速器技术的基础上, 通过改进加速结构, 研制了一台低能强流电子加速器, 其设计指标为500 keV/150 mA。该加速器采用高压发生器倒置的结构, 并增加了中磁圆盘, 提高了电能转换效率。采用了较短的加速管结构, 有利于强流电子束的传输, 同时使加速器整体更为紧凑。加速器束流调试结果为500 kV/170 mA, 完全优于设计指标。

关键词: 电子加速器; 高压发生器; ANSYS电磁模拟

中图分类号: TL52　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.043

1 引言

近年来, 电子加速器发展迅速, 已成为辐照加工产业的关键设备, 且广泛应用于电线电缆和热缩产品的辐照交联、烟气脱硫脱硝、医疗器械消毒、半导体材料加工和食品保鲜等行业[1]。目前辐照加工业常用加速器以地那米、ELV为主, 而我国自行研制的DG型加速器也开始进入市场并受到用户的青睐, 这些加速器均以中能为主, 500 kV及以下能量段加速器比较少见。随着我国橡胶辐照交联、医用薄膜和片材辐照技术的不断发展, 低能强流加速器的需求日趋紧迫。同时低能电子加速器可以实现自屏蔽, 整个设备可以很便利地安装在生产线上, 操作方便, 占地小, 防护成本低。而国内现有的低能加速器机型很少, 且通常束流不大于100 mA, 同时辐照加工行业的进一步发展, 需要更大功率的低能电子加速器来提高加工速度和运行效率。因此, 应中国工程物理研究院流体物理研究所科研实验需要, 为其研制了一台500 keV/150 mA的高压变压器型电子加速器。

2 加速器整体设计

研制的低能强流电子加速器为高压变压器型加速器, 其总体结构如图1所示。主要由高压发生器、电子枪、加速管、束流引出系统及控制系统组成, 其高压电极端位于钢筒中部, 高压发生器倒置于钢筒上部,

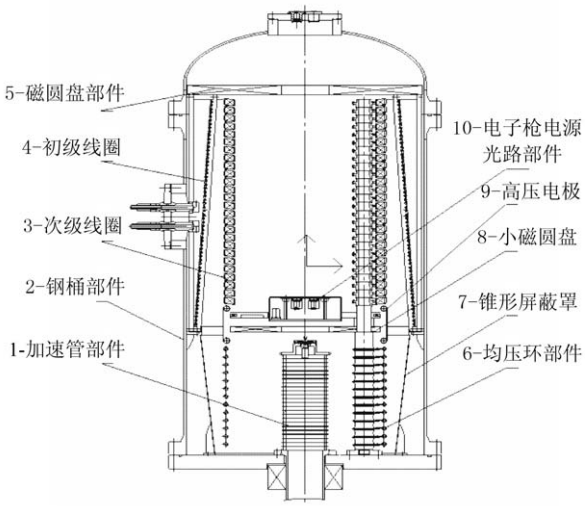

图 1　电子加速器结构图

收稿日期: 2013-03-30;　**修改日期:** 2013-09-24
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(11105195)
作者简介: 俞成山(1988–), 男, 甘肃武威人, 硕士, 从事核技术及应用研究; E-mail: yuchengshan@impcas.ac.cn
通信作者: 张子民, E-mail: zzm@impcas.ac.cn。

http://www.npr.ac.cn

磁路闭合，加速管位于钢桶下端磁路以外，以避免漏磁对加速管中传输束流的影响。同时加速管采用了较短的尺寸，以利于强流电子束的聚焦和传输。其工作原理是：初级线圈由中频发电机组供给交流电，由感应耦合式级联倍压整流系统产生直流高压并加载在加速管上形成加速电场，由 LaB_6 热阴极产生的电子束通过高真空变梯度场加速管被聚焦、加速，经扫描穿过钛薄进入大气进行辐照加工。

2.1　高压发生器

高压发生器的主要功能是产生电子束所需的加速电场，主体是无铁芯式变压器。主要由 25 匝初级线圈及 26 组次级整流单元构成。

初级线圈采用 Φ 为 12 mm、壁厚 δ 为 0.8 mm 的三根铜管并联绕制而成，为了改善耦合系数，将其绕制成锥形。次级整流单元由次级线圈、高压整流硅堆 (80 kV/1 A)、两只倍压滤波电容 (20 kV/20 000 pF) 并联组成。初级线圈和次级整流单元同心地置于加速器钢筒内部；利用中频发电机组将工频转换成 400 Hz 的中频交流电供给初级线圈，多个次级线圈感应耦合、经全波倍压整流后串联就形成了加速器所需的直流高压。

(1) 绝缘性能分析

早先的 DG 型电子加速器采用在钢筒中充 SF6 气体来保证绝缘性能，在加速器需要维修时，SF6 气体无论是直接排放还是回收再利用都存在维护成本较高的问题[2]。该低能强流电子加速器通过优化高压结构，采用了 N_2/CO_2 混合气体绝缘方式，可大大降低维护成本。采用 ANSYS 建模模拟了加速器内部电场分布，如图 2 所示。由图 2 中的结果可以看出，电场分布比较均匀，场强最高值出现在高压电极附近，接近 70 kV/cm。参考 N_2/CO_2 混合气体在 0.8 MPa 气压下的击穿电压特性[3]，最大电场值处于安全范围内。在加速器充 0.8 MPa 的 N_2/CO_2 混合气体 (3:1比例) 条件下，进行了空载试验，通过高压锻炼，高压达到 600 kV，长时间工作无击穿和放电发生。完全满足加速器正常工作时的绝缘要求。

(2) 负载性能分析

为了保证高压绝缘的要求，初级线圈与次级线圈及次级线圈层间必须保持足够的绝缘距离，但是过大的间距会造成初级和次级线圈之间的耦合效率降低。

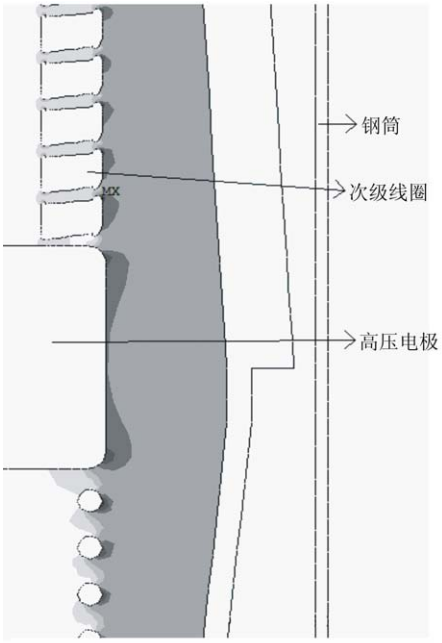

图 2　加速器内部电场分布图

为了兼顾上述两方面的要求，将初级线圈绕制成锥形，并对其铜管的排布方式进行优化，使得各层次级整流单元的电压尽量均匀。另外，在高压发生器的底部 (加速器钢筒的中间) 增加了一个中磁圆盘，使高压发生器内部磁路更为封闭，提高了整个高压发生器的耦合效率，从而提高高压发生器的负载能力。

设计中采用有限元分析软件 (ANSYS) 对加速器的耦合情况进行了模拟计算，得到了各个次级线圈上的电压分布，结果如图 3 所示。由图中计算结果可以看出，加速器在空载和负载状态下的耦合效率都比较高，并且各层次级整流单元上的电压分布都比较均匀。这样就避免了加速器在工作过程中由于耦合不均匀造成的局部电场过高而出现的层间打火现象，提高了加速器的负载能力和长时间工作稳定性。

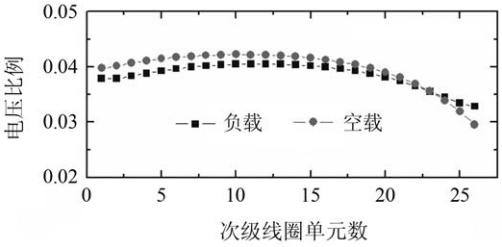

图 3　次级线圈耦合分布图

2.2　电子枪和加速管

鉴于 LaB_6 阴极寿命长，抗中毒能力强，工作真

http://www.npr.ac.cn

空度要求低，工作稳定等特点，故电子枪采用 LaB_6 阴极，如图4(a) 所示。电子枪位于加速管端部，与加速电极共同组成电子光学系统。图4(b) 所示为电子枪实物图，电子枪阴极直径为10 mm，阴极外套直径为30 mm。

加速管由氧化铝陶瓷和不锈钢金属片粘接而成，

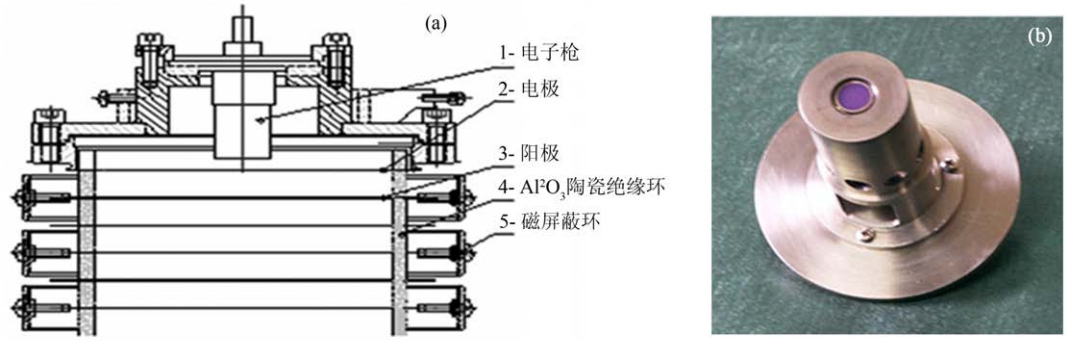

图 4　电子枪及加速管

(a) 电子枪及加速管端部；(b) 电子枪实物。

其结构如图5所示。每段瓷环高度为20 mm，不锈钢电极厚度1 mm，作为电子枪引出阳极的电极片内孔径为20 mm，其余电极片内孔径均为100 mm，大的加速管电极内径可以减小气阻，保证加速管真空度，便于束流传输。

图 5　加速管实物图

由于加速器内无法安装独立的聚焦系统，早先的DG型加速器利用前10段瓷环的变梯度电场来对电子束进行预聚焦，后段瓷环等梯度电场加速的方式实现电子束的加速传输。在该低能强流电子加速器中，为了保证强流电子束的聚焦加速，对其引出结构进行优化，通过改变电子枪枪套的锥度，使得电子枪阴极发射面略低于枪套面，如图4(b) 所示为优化后的电子枪实物图。

用EGUN程序模拟计算了锥度改变前后，加速管内电子束的传输情况。图6为电子枪在锥度增加15度前后，电子束在加速管内传输轨迹的对比。由结果可见，带锥度的电子枪结构对电子束在加速管内的传输影响较大，在阴极发射面处对电子束进行了预聚焦，使得整个束流径向尺寸更小，在加速管内的束流损失较少。调试时经测量束斑尺寸小于8 mm，可见其设计的合理性。

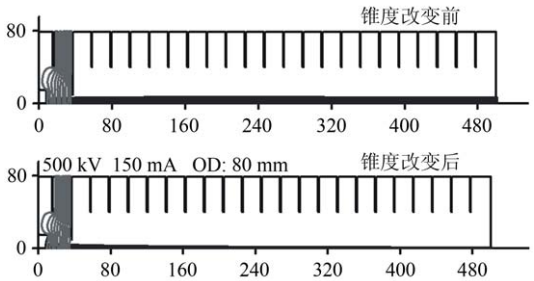

图 6　电子束在加速管内的传输轨迹

3　调试结果

采用DG型加速器通用控制系统对该加速器进行了调试，最高空载电压达到600 kV，且长时间工作稳定，实际运行能量为500 keV时，最大束流强度达到170 mA。同时按照工业要求进行了8 h连续无故障运行测试，在加速器运行过程中对加速器应用中相关的几个关键指标进行了测试，其中包括能量不稳定度、束流不稳定度和束流扫描不均匀度，不稳定度等均按照辐照行业规定的公式进行计算，而束流扫描不均匀度的计算公式与下式(1) 类似：

http://www.npr.ac.cn

$$不稳定度\% = \pm\frac{最大值-最小值}{最大值+最小值}\times 100\%。\quad (1)$$

根据设计要求，能量和束流不稳定度的测试是在能量设定为500 keV，束流设定为150 mA 时，每5 min对能量 E 和束流 I 参数记录数据一次，共记录10个数据，并按照公式(1)进行计算，数据如表1所示。

表 1　能量束流稳定度测试数据

时间	E/keV	I/mA
14:47	495	151
14:52	502	147
14:57	503	153
15:02	510	151
15:07	508	152
15:12	501	153
15:17	510	153
15:22	510	150
15:27	509	151
15:32	505	152

经计算能量不稳定度为±1.5%，束流不稳定度为±2%，均好于工业标准±5%的要求。束流不均匀度的测试是在500 keV/5 mA的条件下，将束流扫至满窗，在钛窗正下方设置10根金属园杆，测量每根杆上所接收的束流，束流经电路转换为电压信号后进行采集。表2为束流不均匀度实验中电压实测值，经计算不均匀度为±8.5%，好于工业标准小于±10%的要求，其实测束流不均匀度曲线如图7所示，钛窗中心部位束流分布值最大，向钛窗两边呈线性对称逐渐减小趋势。根据以上数据分析表明，该加速器已完全达到了设计指标，并且最终500 keV/170 mA的实际调试结果更是完全超出了原来500 keV/150 mA的设计指标，8 h的连续运行测试也表明，该加速器完全达到了辐照加工业对其稳定性的要求。

表 2　束流均匀度测试数据

位置	电压/V	位置	电压/V
1	1.91	6	2.24
2	1.99	7	2.16
3	2.09	8	2.08
4	2.17	9	1.99
5	2.23	10	1.89

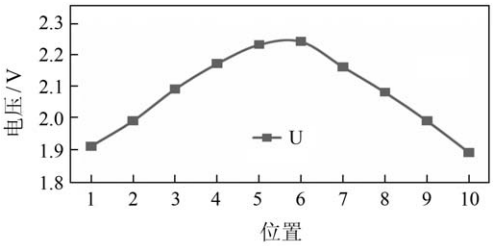

图 7　束流扫描均匀度分布曲线

4　结论与展望

通过该加速器的成功研制，发现使用ANSYS对加速器耦合部分的建模模型是完全合理的，而且模拟结果与实际调试结果基本一致，EGUN程序设计的束流光学部分与实际调试也比较吻合，高压芯柱与加速管的分体设计保证了束流传输过程不受漏磁影响，这些因素使得实际调试指标完全高于设计指标。同时，通过调试发现该机型最大束流强度有能力突破200 mA。到目前为止，DG型加速器能量已可以涵盖0.5～2.5 MeV，束流强度与目前国内常见产业化机型相比，有明显的优势，况且该类型加速器结构紧凑、电能转化效率高、运行稳定，因此该加速器的研制成功将满足我国辐照工业对于低能强流自屏蔽加速器的迫切需求。

参考文献：

[1] CAO Shunchun. Theoretical and Experimental Research on High Voltage Transformer Type Electron. Accelerator[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics,Chinese Academy of Sciences, 2009(6): 33–51. (in Chinese)
(曹树春. 高压变压器型电子加速器理论与实验研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2009(6): 33–51.)

[2] CAO Shunchun, ZHANG Zimin, LI Zhongping, *et al.* Nuclear Techniques, 2009, **32**(3): 206. (in Chinese)
(曹树春, 张子民, 李中平, 等. 核技术, 2009, **32**(3): 206.)

[3] SUN Zhenwu. Development of 4MV Ion Electrostatic Accelerator[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006(4): 58-63. (in Chinese)
(孙振武. 4 MV离子静电加速器的研制[D]. 郑州: 郑州大学, 2006(4): 58-63.)

[4] CAO Shuchun, LIU Ming, ZHANG Zimin, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(3): 266. (in Chinese)
(曹树春, 刘铭, 张子民, 等. 原子能科学技术, 2009，**43**(3): 266.)

http://www.npr.ac.cn

Development of a High-current Electron Accelerator with Low Energy

YU Chengshan[1, 2, 3], LI Weifeng[4], CAO Shuchun[1, 3], LI Zhongping[1, 3], JING Xiaobing[4], SHI Jinshui[4], YANG Xinglin[4], ZHANG Zimin[1,3], XIAO Rongqing[1, 3], SHEN Xiaokang[1, 3], ZHAO Quantang[1, 2, 3], JING Yi[1, 3], ZONG Yang[1, 2, 3], WANG Yanru[1, 2, 3]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Gansu Province Radiation Engineering Research Center, Lanzhou 730000, China;
4. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Based on the technology of the DG series electron accelerator, a 500 kV/150 mA electron accelerator was designed and manufactured at IMP(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences). The new structure of high voltage and shorter accelerating tube have been used in this accelerator for high current. The specific features of this accelerator are compact of structure and higher power conversion efficiency. It has already passed the running test of 500 kV/170 mA, and the parameter is better than the designed value.

Key words: electron accelerator; high voltage generator; ANSYS electromagnetic simulation

Received date: 30 Mar. 2013;　**Revised date:** 24 Sep. 2013

Foundation item: Youth Funds of National Natural Science Foundation of China(11105195)

Corresponding author: ZHANG Zimin, E-mail: zzm@impcas.ac.cn.

http://www.npr.ac.cn