

DG 系列大功率工业辐照电子加速器

曹树春^{1,2} 张子民¹ 李中平¹ 万 明¹ 刘 铭¹ 张应发¹ 苏雅龙^{1,2}

陆锡宏¹ 景 漪¹ 肖荣庆¹ 袁 平¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 中国科学院近代物理研究所成功研制了 DG 系列中频变压器型工业电子加速器, 其中 DG-2.5 型加速器能量范围 1.0–2.5 MeV, 最大束流功率 90 kW, 束流扫描有效宽度 1000 mm, 适用于各种辐照领域; DG-1.2 型能量范围 0.8–1.2 MeV, 最大功率 50 kW; 这两种型号加速器均通过了长时间测试, 工作稳定、故障率低, 采用计算机自动控制, 并可与束下传动系统连锁, 完全达到了工业应用的标准。

关键词 电子加速器, 束流能量, 束流功率, 工业辐照

中图分类号 TL503

近年来, 低能电子加速器发展迅速, 广泛应用于电线电缆和热缩产品的辐照交联、医疗器械消毒、半导体材料加工、食品保鲜和粮食储存等。我国辐照用电子加速器主要有两种类型, 一是高频高压型, 制造单位有中国科学院上海应用物理研究所、无锡爱邦辐照公司和江苏达胜热缩材料有限公司, 这种加速器最高能量可达 5 MeV, 最大功率超过 100 kW, 占据国产加速器的大部分市场; 另一种是变压器型高压加速器, 主要是俄罗斯 Budker 核物理研究所制造的 ELV^[1] 系列电子加速器, 其中 ELV-8 和 ELV-6 销量最好, 据统计, 销于我国的 ELV-8 已近

30 台。

2007 年 6 月, 中国科学院近代物理研究所研制成功 DG 系列变压器型电子加速器, 表 1 为此系列加速器的型号与参数, 其中 DG-2.5 和 DG-1.2 已通过专家测试, 完全达到同类型加速器的技术指标和运行标准。中科院近物所已进行 DG 系列加速器的产业化推广, 使之在中国的辐照加工领域内发挥重要作用, 实现变压器型加速器的国产化。

DG 系列电子加速器的主要特色是结构简单、操作方便、长时期运行稳定、故障率低。本文系统介绍 DG 系列电子加速器的结构与性能。

表 1 DG-型电子加速器主要参数
Table 1 Basic parameters of the DG-type electron accelerator

型号 Type	能量范围 Energy range /MeV	束流功率 Beam power /kW	最大流强 Max. beam current /mA
DG-0.4	0.2–0.4	20	50
DG-0.8	0.4–0.8	32	50
DG-1.2*	0.8–1.2	50	50
DG-1.5	1.0–1.5	150	100
DG-2.5*	1.0–2.5	90	50

*已通过运行测试 Test operation passed.

1 加速器整体描述

DG 型电子加速器的设计结构紧凑, DG-1.2 型电子加速器的主体图如图 1。初级线圈、高压芯柱、加速管和高压电极安放在充有 0.8 MPa SF₆ 绝缘气

体的密闭容器内, 从而沿着高压芯柱可以获得较高的电气强度。加速管同心地安装在高压芯柱中, 电子枪置于加速管顶部。加速器基本工作原理是: 电子束从电子枪阴极发射, 通过加速管中的高压电场获得加速, 最终从扫描引出装置出射到大气中; 辐照样品经过传动系统被传送到扫描窗下进行辐照加

国家发改委产业化项目(JW021105)资助

第一作者: 曹树春, 男, 1982 年 2 月出生, 现为中科院近代物理研究所博士研究生, 主要研究方向工业用大功率电子加速器技术

通讯作者: 张子民

收稿日期: 2008-09-08, 修回日期: 2008-12-30

工。DG-2.5 型电子加速器基本结构与 DG-1.2 型相似,只是次级整流单元数目增多,从而整体高度增加了,DG-2.5 型加速器的整体外形如图 2 所示。

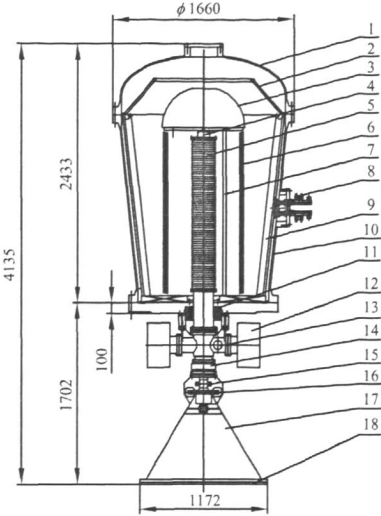


图 1 DG-1.2 型主体结构图

Fig.1 General view of the DG-1.2 accelerator.

- 1) Top cover, 2) High voltage shield, 3) High voltage electrode, 4) Electron gun, 5) Accelerating tube, 6) Rectifier section, 7) Energy divider, 8) Primary winding terminal, 9) Primary winding, 10) Vessel, 11) Focusing lens, 12) Vacuum pump, 13) Vacuum gauge, 14) Vacuum gate valve, 15,16) Scanning coil, 17) Extraction device, 18) Extraction window frame

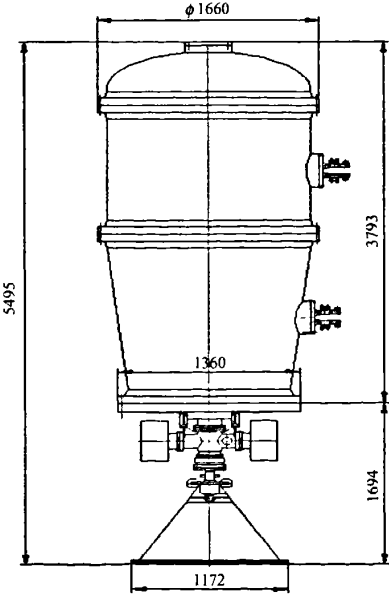


图 2 DG-2.5 外形安装尺寸图

Fig.2 Overall dimension of the DG-2.5 accelerator.

1.1 高压发生器

加速器高压是由感应耦合式高压发生器产生的,其主体是无铁芯式变压器,初级线圈和次级整流单元同心地置于加速器钢筒内部,初级线圈 30 匝,次级整流单元由次级线圈、高压电容(40 kV/10000 pF)、整流硅堆(80 kV/1A)组成,次级线圈 3000 匝,多个次级线圈感应耦合整流倍压后串联就形成了加速器所需的高压。该高压发生器工作原理类似于变压器,其特色:无铁芯方式简化了高压发生器的整体结构,高压电极和地电位屏蔽面的设计,提高了系统的电击穿强度;在绝缘气体保护下,高压发生器的性能稳定,极少发生高压击穿,即使偶尔有放电打火,一般只有少量电容或高压硅堆损坏。

1.2 电子枪和加速管

电子枪采用六硼化镧阴极,阴极直径 10 mm,阴极外套直径 30 mm (图 3),电子枪位于加速管端部,与加速电极共同组成电子束光学系统。加速管由氧化铝陶瓷和钛金属片经压力扩散焊接连接而成,相邻电极片间距为 20 mm,作为电子枪引出阳极的电极片内径 20 mm,其余电极片内径为 80 mm,均为平板电极。加速管外部增加了磁屏蔽环,目的是为了避免加速器内交变磁场对电子束加速和传输的干扰。每段加速管高度 296 mm,DG-1.2 和 DG-2.5 的加速管数分别为 5 段和 8 段。由于加速器内无法安装独立的聚焦系统,所以我们利用第一段加速管的变梯度电场来实现对电子束的预聚焦,并采用 SAM^[2]程序对加速管内电子束加速和传输情况进行了模拟计算,图 4 为第一段加速管计算图形(图中横纵坐标分别为加速管轴向尺寸,上方竖直线段代

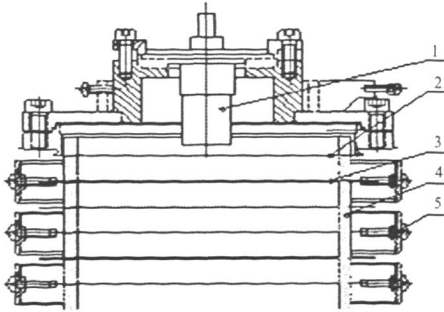


图 3 第一段加速管结构图

1)电子枪 2)电极 3)阳极 4)氧化铝陶瓷 5)磁屏蔽环

Fig.3 Structure of the first accelerating tube

- 1) Electron gun, 2) Electrode, 3) Anode, 4) Alumina porcelain, 5) Magnetic shield ring

表电极片尺寸及位置, 下方近似平行线束表示束流径迹, 弯曲线为加速管中心轴上的电场), 非均匀电场提供了较好的聚焦, 使得电子束接近平行传输。

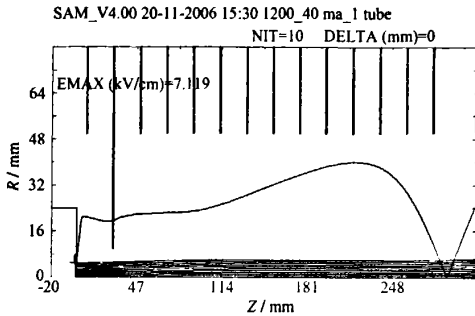


图 4 第一段加速管电子轨迹
Fig.4 Electron trajectories of the first tube

1.3 束流扫描引出系统

束流引出系统由扫描窗、聚焦磁铁、高频扫描磁铁、低频扫描磁铁及相应的供电电源组成。聚焦磁铁结合四相光阑确定束流位置信息, 使电子束无损地进入扫描引出窗入口; 高、低频扫描磁铁产生相互垂直的交变磁场, 使电子束均匀地从 40 μm 厚的钛箔引出。此外, 整个扫描窗绝缘, 以获得束流引出信息。束流引出装置如图 5 所示, 低、高扫描频率分别为 100 Hz 和 1600 Hz, 束流扫描不均匀度 6.5%, 低于 10% 的国家标准。测试方式如下: 在钛窗下 80 mm 处 1100 mm 范围内放置 11 根 $\phi 10$ mm 的等长铜条并通过等值电阻接地, 测量各路电压(即铜管上沉积的束流), 测试结果见图 6(束流参数 1.2 MeV/530 μA)。

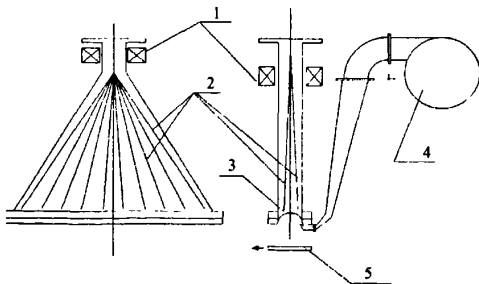


图 5 扫描窗引出装置示意图
1)扫描磁铁 2)束流径迹 3)钛箔 4)风机 5)移动靶

Fig.5 Schematic diagram of extraction device with a foil window

1) Scanning magnets, 2) Beam trajectories, 3) Foil, 4) Cooling fan, 5) Movable target

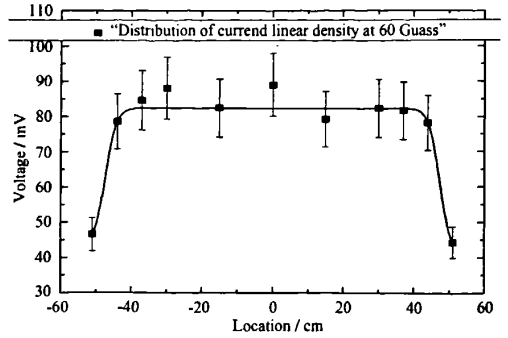


图 6 束流扫描均匀度测试结果
Fig.6 Typical distribution of current linear density by scanning

1.4 控制系统

控制系统分为强电控制和弱电控制两部分组成。强电控制加速器各个单元的供电。弱电主要控制加速器的运行, 其采用上、下位机结构; 下位机采用 Siemens 的 S7-200 PLC, 实现加速器的自动控制; 上位机采用研华工控机, 实现人机交互, 监控加速器的运行状况并记录运行数据。同时, 该控制系统还预留了与束下传动装置的控制接口。

2 DG 系列加速器调试结果

目前, 已有 DG-1.2 和 DG-2.5 两种型号加速器研制成功, 最高运行参数分别为 1.2 MeV/40 mA 和 2.2 MeV/40 mA, 由于目前采用中频电机供电, 效率约为 68%, 若采用 IGBT 中频电源供电, 效率有望超过 90%。加速器能量不稳定性低于 5%, 束流不稳定性小于 8%, 束流扫描有效宽度 1000 mm, 扫描不均匀度低于 10%, 所有这些参数均满足工业辐照要求。

3 结论

目前 DG 系列加速器完全达到了工业辐照领域的应用要求, 其可应用的辐照领域有: (1)电线电缆和辐照交联; (2)热收缩产品加工; (3)半导体材料改性; (4)橡胶预硫化; (5)粮食、中药材杀虫灭菌; (6)医疗卫生器械消毒; (7)科学实验研究。

参考文献

- 1 Salimov R A, Cherepkov V G, Golubenko J I, et al. Radiation Physics and Chemistry, 2000, 57: 661-665
- 2 Ivanov A V, Tiunov M A. ULTRASAM - 2D Code for

Simulation of Electron Guns with Ultra High Precision.

1634–1636

Proceedings of ECAP 2002, Paris, France, 2002.

High power low-energy DG-series accelerators for E-beam processing

CAO Shuchun^{1,2} ZHANG Ziming¹ LI Zhongping¹ WAN Ming¹ LIU Ming¹ ZHANG Yingfa¹
SU Yalong^{1,2} LU Xihong¹ Jing Yi¹ XIAO Rongqing¹ YUAN Ping¹

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract DG-series industrial electron accelerators of intermediate frequency transformer type have been successfully researched and developed in the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science. The DG-2.5 accelerator with beam energy range of 1.0–2.5 MeV, maximum beam power of 90 kW and length of extraction window up to 1000 mm, is suitable for many kind uses of the radiation technology. DG-1.2 accelerator, another type with beam energy range of 0.8–1.2 MeV and beam power of 50 kW, was also designed and constructed. The two accelerators have been tested with long-term operations. They were proved as E-beam irradiators of high reliability, very low malfunction rates and high efficiency.

Key words Electron Accelerator, Beam energy, Beam power, Industrial radiation

CLC TL503