

《原子核物理评论》

www.npr.ac.cn Nuclear Physics Review



Started in 1984

X波段2 MeV小焦点加速器研制及应用

牟启航 李杰成 柳淘 周霖 邓阳全 马杰 杜百廷 刘勇涛

R&D and Application of the X-band 2 MeV Small Focal Spot Accelerator

MOU Qihang, LI Jiecheng, LIU Tao, ZHOU Lin, DENG Yangquan, MA Jie, DU Baiting, LIU Yongtao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC70

引用格式:

牟启航, 李杰成, 柳淘, 周霖, 邓阳全, 马杰, 杜百廷, 刘勇涛. X波段2 MeV小焦点加速器研制及应用[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):418-425. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC70

MOU Qihang, LI Jiecheng, LIU Tao, ZHOU Lin, DENG Yangquan, MA Jie, DU Baiting, LIU Yongtao. R&D and Application of the X-band 2 MeV Small Focal Spot Accelerator[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):418-425. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC70

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于悬浮拓扑的加速器脉冲电源设计

Design of Pulse Power Supply for Accelerator Based on Floating Topology 原子核物理评论. 2022, 39(4): 463-469 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022003

强流重离子RFQ加速器高频反馈控制研究

Research on Radio Frequency Feedback Control of High Intensity Heavy Ion RFQ Accelerator 原子核物理评论. 2022, 39(4): 454-462 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022016

利用FLUKA研究加速器生产医用放射性同位素的产额

Study of Medical Radioisotopes Production by Accelerator Induced Reactions with FLUKA 原子核物理评论. 2020, 37(4): 913-917 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020025

一种测量重核素的小型高压型加速器控制系统的研制

Development of a Control System for a Small High-pressure Accelerator for Measuring Heavy Nuclide 原子核物理评论. 2019, 36(4): 426-432 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.426

国产小型加速器质谱仪及其应用前景

The Homemade Compact Accelerator Mass Spectrometry and It's Applications 原子核物理评论. 2023, 40(2): 257-263 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022082

小型加速器质谱系统研制及分析技术研究

Development the Miniaturized AMS System and Its Analysis Technique 原子核物理评论. 2020, 37(3): 784-790 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC01 文章编号: 1007-4627(2024)01-0418-08

X波段2MeV小焦点加速器研制及应用

牟启航¹、李杰成¹、柳 淘¹、周 霖¹、邓阳全¹、马 杰¹、杜百廷²、刘勇涛^{1,†}

(1. 西华大学理学院,成都 610039;
 2. 中国科学技术大学,合肥 230022)

摘要:针对现代航空发动机涡轮叶片等军工和基础重工业领域的现场高能无损检测需求,西华大学加速器团队结合 X 波段小型化加速器技术,独立自主设计、研制了核心器件 X 波段 2 MeV 小焦点加速管,并集成研制了一台可移动的 X 波段 2 MeV 小焦点加速器射线装置。该装置集成了 X 波段小焦点驻波加速管、磁控管、微波传输系统、真空系统和屏蔽体组成的加速器机头、高压脉冲调制器、控制系统和冷却系统等分系统。其中,小焦点加速管采用驻波电耦合结构,长度小于100 mm,输出能量为 2 MeV,焦点尺寸≤0.7 mm,1 m处剂量率≥40 cGy/min。 X 波段 2 MeV 小焦点加速器研制成功后,基于该装置完成了可移动 2 MeV 小焦点 CT 系统的搭建,并进行了系统性能的测试和应用,所获取图像空间分辨率显著优于同类型 S 波段高能 CT 产品。 关键词:X 波段:小焦点:加速器

中图分类号: R197.39; TH789 文献标志码: A DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC70

0 前言

电子直线加速器已经在国民经济诸多领域,例如放 射医疗、辐照加工、无损检测、安检以及农业等领域, 获得了广泛的应用,并取得了卓著的成绩^[1-2]。目前, 应用最为广泛的是S波段加速器,整机系统体积较大, 主要在固定场所进行安装和运行。随着现代工业和军工 领域的发展,有些被照射物体不宜或不能移动,如在役 重型电机、大型化工设备、航天器等,或房屋、桥梁等 建筑物,就需要用使用可移动的加速器进行现场检测。 此外,在高端放射治疗领域,便携式电子直线加速器可 以作为轻便的移动式"放疗机"进行术中放疗或球面放疗。 因此,结构紧凑、体积小、重量轻的小型移动式加速器 研制,对加速器在工业、医疗领域的应用非常有必要, 也是未来应用型加速器发展的必然趋势^[3-7]。

加速器的焦点尺寸也是关键技术参数之一,小焦点 加速器在工业无损探伤领域可以获得更好的空间分辨率, 可对工件的细微缺陷进行检测。目前,航空发动机涡轮 叶片等效厚度较大,三维结构形貌复杂,常规240 kV 微焦点和450 kV常规焦点射线源无法穿透或清晰检测叶 片形貌及尺寸。现有市场上常规S波段加速器焦点尺寸较 大,约为1.5~2.0 mm,空间分辨率在1.5~2.0 Lp/mm^[8], 难以满足高分辨率高能无损检测成像系统的需求。针对 以上难题,结合X波段加速器对于S波段加速器具有更 小的尺寸、重量这一特点^[9-12],西华大学加速器团队 提出并开展X波段2MeV小焦点可移动加速器射线源 装置的研制,焦斑直径小于等于0.7mm,1m处剂量率 不低于30cGy/min,具体设计参数及测试结果见表1, 以求能够实现满足更高能量和空间分辨率的成像需求, 解决目前航空叶片无损检测、现场检测等没有合适高性 能高能射线源的难题。

表1 X波段2MeV小焦点加速器设计参数及测试结果

项目	设计参数	测试结果
总体尺寸/mm ³	1 040×840×640	1 040×840×640
重量/kg	≤500	370
能量/MeV	2	2
频率/MHz	9 300±3	9 297.15
波段	X波段	X波段
焦点大小/mm	≤0.7	0.69
1 m处剂量率(/cGy·min ⁻¹)	≥30	≥40
移动性	整机可移动	整机可移动
加速类型	驻波	驻波

作者简介: 牟启航 (1999-), 男,四川犍为人,硕士研究生,从事加速器物理研究; E-mail: 1254277928@qq.com

收稿日期: 2023-09-03; 修改日期: 2024-02-11

基金项目:四川省科技计划项目(2021YJ0518)

[†]通信作者:刘勇涛, E-mail: lytao@foxmail.com

1 加速器整机研制

X波段2MeV小焦点加速器系统由高压脉冲调制器、 加速器机头、冷却系统和控制系统等组成。其中加速器 机头包括磁控管、微波传输系统、加速管、屏蔽系统和 剂量监测系统等,加速器机头尺寸为1040mm×840mm× 640mm,可以产生2MeV能量X射线,焦点尺寸为 0.69mm,1m处最大剂量率超过40cGy/min。加速器 整机实物图如图1所示,加速器机头重量约370kg,为 S波段2MeV加速器一半重量,可以安装在移动托架上 进行运输、移动,满足现场检测的应用需求。



图 1 X 波段 2 MeV 小焦点加速器实物图

1.1 加速管研制

加速管是加速器的核心部件,其原理是利用高功率 微波在加速结构中建立的高梯度加速电场,将电子枪产 生低能电子加速至高能,打靶并产生X射线,用于放疗、 成像或者其他应用。本项目X波段加速管是西华大学加 速器团队结合项目需求,基于现有成熟X波段微波功率 源自主设计、研制开发的2MeV小焦点加速管。本节 内容主要包括电子枪物理设计;加速管腔体设计及束流 动力学设计优化;加速管的微波调谐及工艺制作。

1) 电子枪设计

电子枪是加速器的电子源,选用热阴极二极枪,材 料为钡钨阴极,具有发射稳定、不易中毒、寿命长的优 点。依据蒙特卡罗计算,2 MeV电子束流打靶平均流强 达到100 μA,靶1 m 处剂量产额才能达到30 cGy/min。 按照驻波加速管俘获系数为35%,工作比为0.08%计 算,电子枪发射脉冲电流需要达到350~400 mA。使用 三维电磁场软件 CST 对电子枪开展了设计,选取电子 枪工作电压 8~13 kV 可调,发射流强达到350 mA 以上。 电子枪的注腰尺寸小以及层流性好,有助于加速管焦点 的小型化设计及研制,以此为准则对电子枪进行优化, 优化后电子注发射包络如图2 所示,典型工作电压为 10 kV,发射脉冲流强为360 mA,电子注腰位置距离阴 极为15 mm,层流性较好,注腰发散较缓,注腰直径 为0.7 mm。



图 2 电子枪发射包络图

2) 腔体设计及束流动力学设计优化

为了保证加速结构的紧凑,加速管采用 π/2 模驻波 加速结构。目前驻波加速结构通常会选择磁轴耦合或边 耦合方式,腔间耦合系数通常较大,行波加速结构采用 电轴耦合,腔间耦合系数小。由于该项目束流能量较低, 腔数少,无需太大的耦合系数,结合电耦合结构腔体旋 转对称,易于车削加工的优点,最终选择采用驻波电轴 耦合加速结构。

X波段2 MeV加速管整管示意图如图3所示,由7 个加速腔,6个耦合腔组成。通过束流动力学仿真优化, X波段2 MeV加速管最终加速腔的相速依次为0.35, 0.60,0.80,0.89,0.92,0.99,0.99,逐渐递增。电子 枪产生的电子注,在各加速腔进行聚束加速,电子速度 与腔体的相速相适配才能达到聚束加速的效果,最终加 速至2 MeV。加速管整管有效分路阻抗为71 MΩ/m, 长度约为95 mm,耦合系数为1.35%,主模相邻模式间 隔在10 MHz以上,加速管整管的设计电场分布如图4 所示。当加速管壁损为0.6 MW时,加速管可以将电子 枪注入的10 kV,360 mA电子束流加速至2 MeV以上, 最终打钨靶电子脉冲流强为130 mA,俘获率约为36%, 靶截面电子分布如图5 所示,束斑rms直径为0.6 mm, 远小于常规S波段1.5~2.0 mm常规束斑尺寸。



图 3 X 波段 2 MeV 加速结构示意图

 $\begin{array}{c} 1.8 \times 10^8 \\ 1.6 \times 10^8 \\ 1.4 \times 10^8 \\ \hline 1.2 \times 10^8 \\ \swarrow \\ 1.0 \times 10^8 \\ \swarrow \\ 8 \times 10^7 \\ 4 \times 10^7 \\ 2 \times 10^7 \\ 0 \end{array}$

-10 0

图 4

 $10 \hspace{0.1 cm} 20 \hspace{0.1 cm} 30$

为了保证微波功率高效馈入驻波加速管中,驻波加 速管设计时耦合系数的选择尤为重要。依据

$$\beta_{\text{opt}} = \left(\frac{I}{2}\sqrt{\frac{ZL}{P_0}} + \sqrt{1 + \frac{I^2ZL}{4P_0}}\right)^2,\tag{1}$$

式中 P_0 为输入功率; Z为有效分路阻抗; I为加速束流脉冲流强^[13]; 代入数据可知最佳耦合系数为1.41。通过调节波导耦合孔的尺寸,使得整管的耦合系数为最佳





3) 加速管微波调谐及工艺制作

加速管整管需要经过加工、调谐、焊接、排气等工 艺流程后才能加电测试使用。图7所示为X波段2MeV 加速管腔体及波导窗等部件实物,加速管腔体采用单晶 宝石刀直接车削加工而成,腔体表面粗糙度需要达到 0.1 µm以下,防止高频电场打火。整管调谐后场分布与 设计值的一致性,是加速管性能的重要质量保证,场分 布冷测结果如图8所示,对比图4,调谐后的场分布与 设计值基本一致,说明加速管整管得到了很好的调谐。 另外,加速管整管S参数也是重要的微波特性参数,如 图9所示,整管焊接后中心工作频率为9297.15 MHz, 驻波为1.427,与设计值一致。图10为X波段2 MeV加 速管整管完成焊接、排气后的实物图。

耦合系数1.41,最终整管S参数仿真结果如图6所示。

40 50

Z/mm

加速管电场分布仿真结果

60

70 80

90 100



图 7 X波段2MeV加速管腔体及附件



图 8 X波段2 MeV 加速管整管场分布冷测结果



图 9 X 波段 2 MeV 加速管整管 S 参数 (制作完成)



图 10 加速管整管图

1.2 功率源系统及机头束流模块

X 波段2 MeV 加速器的功率源系统由磁控管和波导 微波链路组成,其主要作用是为加速管提供高功率微波, 并在加速管中建立加速电场。本项目采用 L3 公司 X 波 段 9.3 GHz,峰值功率为 2 MW 的 6170 型号磁控管作为 功率源,实际使用功率为1.2 MW 左右,具有较大的功 率余量,功率源系统具体工作参数见表2,功率源微波 传输链路采用 BJ84 波导进行传输,磁控管和加速管中 间装有四端环行器,其主要目的是防止反射功率返回磁 控管,保护磁控管受到干扰和防止磁控管微波窗损伤。 四端环行器选用飞行泰达P384-1SA 型号,可通过2.5 MW 微波功率。

表 2 功率源主要技术参数

项目	参数值
工作频率/MHz	9 300±10
输出功率/MW	0.8~2.0
脉冲宽度/µs	3.4
工作比/%	0.04
波导型号	BJ84
波导气压/MPa	0.18

整个微波源链路与加速管构成了加速器机头的束流 模块,是电子加速并产生X射线的主体,整体布局形状 如图11所示。磁控管上安装有直流调谐电机,加速器 AFC(Automatic Frequency Control)系统通过控制调谐电 机维持磁控管微波频率与加速管频率一致,保证束流模 块的正常工作。加速管由铅、钨屏蔽体包裹,有效减小 加速器在非主束方向的漏射线和对主束方向的干扰。



图 11 加速器机头束流模块

1.3 电源调制器及控制系统

加速器电源调制器是加速器机头的供电系统,可以 为磁控管、加速管提供灯丝电源和脉冲高压,为加速管 离子泵提供4kV直流高压,保证加速管内部维持高真 空状态。其中,电源调制器为磁控管提供为35~40kV, 50~90 A, 3.5 µs的脉冲信号,最高重频可以达到250 Hz。

加速器控制系统采用基于 FPGA 高速采样板进行各 个模块、子系统的数据采集,集成控制以及连锁,并且 通过 Modbus-RTU 通信协议与上位机进行通信。采用 FPGA 作为系统主控制器,利用 FPGA 并行运行能力、 快速的运行速度以及方便的时序处理,大大提高了加速 器各电源模块之间工作时序的调节精度及灵活性。控制 系统的控制原理图如图 12 所示,主要包括与电子枪灯 丝电源、电子枪电源、磁灯丝电源、磁控管高压电源、 离子泵电源、AFC控制系统、冷却水和充气系统等进 行数据采集,高速运算、读写并进行连锁反馈,保证加 速器整机安全、稳定地工作。



2 加速器束流性能测试

X波段2MeV小焦点加速器研制完成后,针对加速器束流打靶产生的X射线能量、剂量率、焦点大小等主要性能参数进行了测试,测试方法及测试结果如下。

2.1 X射线能量测试

束流能量决定了X射线能量和射线的最大穿透深度。 针对X射线能量测试,采用钢板半价层法测量X射线 的能量^[14]。将PTW UNIDOS X射线剂量仪^[15]探头放 置在X射线束0°方向中心轴距离靶1m的位置,并将密 度为7.85 g/cm³的钢板放置于剂量仪探头和靶之间,逐 渐增加钢板的厚度,并记录X射线剂量率,通过钢板厚 度与X射线剂量率之间的关系拟合计算X射线的半价 层,查表得到X射线的能量,测试示意图如图13所示。 测试结果半价层拟合曲线见图14,钢半价层为19.6 mm,



对应能量为2 MeV,此时加速器主要工作参数如表3所列,磁控管和电子枪工作波形图见图15,磁控管脉冲高压、电流分别是35.5 kV,63 A;电子枪脉冲高压、电流分别是10 kV,375 mA。由于电子枪和电源存在匹配问题,电子枪脉冲电流前沿存在过冲现象,加速器最终运行采用电子枪脉冲束流波形平坦处作为有效加速时序。

表 3 X波段 2 MeV 加速器参数		
项目 参数		
重复频率/Hz	200.00	
磁控管高压/kV	35.50	
磁控管脉冲电流/A	63.00	
磁控管输出微波脉冲功率/MW	1.20	
脉宽/µs	3.34	
枪高压/kV	10.00	
电子枪发射电流/mA	375.00	



图 15 磁控管和电子枪波形图

2.2 剂量率测试

加速器在2 MeV工作条件下,将 PTW UNIDOS X 射线剂量仪探头放置在 X射线束 0°方向中心轴距离靶 1 m的位置,记录 X射线剂量率。加速器运行在 200 Hz 重复频率条件下,测得剂量率为 42.95 cGy/min,满足 设计值≥30 cGy/min。

2.3 焦点测试

加速器焦点尺寸对射线成像效果至关重要,焦点越小,射线成像空间分辨率越高。本文采用双丝像质计成像法测试加速管焦点尺寸^[16],使用奕瑞1616HE2平板探测器放在垂直于X射线中心轴并且距离靶144 cm处,将像质计放置在靶和平板正中间在X射线中心轴上距离靶42 cm处,放大比为3.44,得到双丝像质计影像调制

深度为20%对应的为D6,对应Ug尺寸为0.52mm,代 入式(2)^[16]:

$$\alpha = \sqrt{\frac{(U_g * M)^2 - (2d)^2}{(M-1)^2}},$$
(2)

式中: U₂为几何不清晰度; M为放大比; d为探测器分 辦率: α为焦点尺寸。计算焦点尺寸为0.69 mm, 满足 加速器设计指标。测量参数及测试数据如表4所列,焦 点成像结果如图16所示。

表4 焦	点测试参数及结果	
项目参数		值
靶离像质计距离/cm		42
靶离平板距离/cm		144.4
探测器分辨率d		3.44
放大倍数M		3.44
几何不清晰度Ug	横向	D6
	纵向	D6
焦点尺寸a	横向/mm	0.69
	纵向/mm	0.60



(a)像质计对照尺寸(单位: mm)



(b) 横向

图 16 X 射线焦点测试图及像质计对照尺寸

通过对X波段小焦点加速器的调试和性能测试,加 速器射线能量为2 MeV, 1 m 处剂量率为40 cGy/min, 焦点尺寸为0.69 mm,均达到了设计指标,对比结果见 表1。

3 CT系统成像测试

本文基于X波段2MeV小焦点加速器,搭配奕瑞 1616HE2面阵探测器搭建工业CT,并针对可检测的工 件最大直径、最大高度、最大重量、空间分辨率和密度 分辨率等项目进行了测试,在CT转台水平放置300mm 钢结构件,采用锥束标准CT扫描成像。本文实验条件 如下: 焦距等于1792 mm, SDD为2089 mm, 加速器 重复频率为150 Hz,探测器积分时间为1000 ms,锥束 扫描1440幅投影图像,重建并进行处理测量。实验平 台如图17所示。



图 17 2 MeV 小焦点加速器 CT 现场图

3.1 可检测工件尺寸与最大载荷测试

图 18 和 19 是 X 波段 2 MeV 小焦点加速器 CT 的检测图,系统可检工件最大直径和最大高度可达 300 mm。对 CT 转台进行载荷测试,在 CT 转台放置 100 kg 质量 铅块,启动转台旋转功能,观察转台旋转情况,转台正 常平稳运动、无异响、负载未发生相对位移,达到设计 指标,未再继续增加载荷。



图 18 2 MeV 小焦点加速器 CT 可检测最大直径示意图



图 19 2 MeV 小焦点加速器 CT 可检测最大高度示意图

3.2 分辨率测试

采用均匀圆盘法测试系统空间分辨率和密度分辨率 结果如图 20 所示,系统 10% 调制度下的空间分辨率为



(a) 空间分辨率测试结果



(b)密度分辨率测试结果 图 20 均匀圆盘法测试空间分辨率和密度分辨率测试结果

3.16 Lp/mm,密度分辨率为0.60%,5~35 mm范围线性 尺寸测量精度均小于50 μm。空间分辨率是工业CT的 重要技术指标,该项指标越高,越能识别更为精细的物 体尺寸,基于X波段小焦点加速器的CT空间分辨率优 于常规S波段加速器CT空间分辨率的1.5~2.0 Lp/mm。

如图 21 所示,将阶梯铝块的 CT 尺寸测量值与校准 后的数显千分尺测试值进行比较获得线性尺寸测量精度。 阶梯铝块的 CT 图像及尺寸测量值见表 5,对 5~35 mm 范围线性尺寸的工件测量精度均小于 50 μm。



图 21 阶梯铝块实物图

表 5	线性尺寸测量精度结果表	
105	311/11/11/11/11/11/11/11	

序号	数显千分尺测量/mm	CT尺寸测量/mm	线性尺寸测量误差/mm
1	5.010	4.980	0.030
2	10.013	9.992	0.021
3	15.021	15.022	0.001
4	25.015	25.053	0.038
5	30.027	30.033	0.006
6	34.985	35.015	0.030

4 结论

本文成功研制了 X 波段 2 MeV小焦点加速器, X 射线焦点尺寸为 0.69 mm, 1 m处剂量率可以达到 40 cGy/min以上。并完成了可移动 CT 系统的搭建和测 试,系统可检工件最大直径和最大高度可达 300 mm, 最大载荷可达到 100 kg,系统 10% 调制度下的空间分 辨率为 3.16 Lp/mm,密度分辨率为 0.60%,5~35 mm范 围线性尺寸测量精度均小于 50 µm。从性能上看,基于 X 波段小焦点加速器 CT 的空间分辨率显著优于常规焦 点 S 波段高能 CT 的 1.5~2.0 Lp/mm 空间分辨率,并且加 速器重量只有 S 波段加速器的一半不到。

参考文献:

- MOON J H, KWAK G, HANK J I. Journal of the Korean Physical Society, 2016, 69(6): 1035.
- [2] YUAN Haowei, HOU Mi, GAO Bin. Radiat Detect Technol Methods, 2017, 1: 10.
- [3] WU Xiaowei, SHI Jiaru, CHEN Huaibi, et al. Phys Rev Accel Beams, 2017, 20: 052001.
- [4] JENKINS M, BURT G, KUMAR A V P, et al. Phys Rev Accel Beams, 2019, 22: 020101.
- [5] LEE B N, SONG K B, PARK H D, et al. Status of Kaeri 6 MeV 9.3 GHz X-BAND Electron Linac for CAN-CER Treatment System[C]//5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'14), Dresden, Germany: JACOW, Geneva, Switzerland, 2014: 15.
- [6] SHIN S W, LEE S H, OH S, et al. Journal of the Korean Physical Society, 2018, 72(7): 818.
- [7] YAMAMOTO T, DOBASHI K, NATSUI T, et al. Design of 9.4 GHz 950 keV X-band Linac for Nondestructive Testing[C]// Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [8] LIU Yu, XIAO Dexin, LI Peng, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(07): 1465. (in Chinese).
 (刘宇, 肖德鑫, 李鹏, 等. 原子能科学技术, 2022, 56(07): 1465.)
- [9] MATSUNAGA N, SATO T, YAMADA A, et al. Application of a

Compact X-ray Source with Small Focal Spot Using a 950 keV Linear Accelerator[C]//Conference: International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, Fürth, Germany (DIR 2019), 2019.

- [10] GABELLA W E, BRAU C A, CHOI B K, et al. Nucl Instr and Meth, 2013, 309: 10.
- [11] LI G H, CHEN H B, ZHENG S X, et al. Atomic Energy Science & Technology, 2006, 28: 117.
- [12] SHIN S W, LEE S H, LEE J C, et al. Journal of the Korean Physical Society, 2017, 71(12): 1048.
- [13] LEE B N, PARK H, SONG K B, et al. Journal of the Korean Physical Society, 2014, 64(2): 205.
- [14] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 20129-2015. Electron linac for non-destructive testing[S]. Standards Press of China. 2015 (in Chinese).
 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 20129-2015. 无损检测用电子直线加速器 [S]. 中国标准出版社. 2015.)
- [15] Dosimetry Solutions for Radiation Medicine[EB/OL]. [2023-08-20]. https://www.ptwdosimetry.com/en/.
- [16] SUN Chaoming, TANG Guangping, LI Qiang, et al. Nuclear Technology, 2015, 38(11): 19. (in Chinese)
 (孙朝明, 汤光平, 李强, 等. 核技术, 2015, 38(11): 19.)

R&D and Application of the X-band 2 MeV Small Focal Spot Accelerator

MOU Qihang¹, LI Jiecheng¹, LIU Tao¹, ZHOU Lin¹, DENG Yangquan¹, MA Jie¹, DU Baiting², LIU Yongtao^{1,†}

School of Science, Xihua University, Chengdu 610039, China;
 University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China)

Abstract: Targeting the requirements of on-site high-energy non-destructive testing on modern aviation engine turbine blades and other military and basic heavy industry products, the accelerator research team at Xihua University has independently designed and developed a core device, the X-band 2 MeV small focus accelerator tube, working with X-band miniaturization accelerator technology. They have also integrated and developed a movable X-band 2 MeV small focus accelerator radiation device. The device integrates several subsystems, including X-band small focus standing wave accelerator tube, magnetron, microwave transmission system, accelerator head made of vacuum system and shielding body, high-voltage pulse modulator, control system, and cooling system. Among them, the small focus acceleration tube adopts a standing wave electric coupling structure, with a length of less than 100 mm, an output energy of 2 MeV, a focus size of less than 0.7 mm, and a dose rate of greater than 40 cGy/min at 1 m. After the successful development of the X-band 2 MeV small focus accelerator, a movable 2 MeV small focus CT system was built based on the device, and the system performance was tested and applied. As a result, the obtained image spatial resolution was significantly better than that of similar S-band high-energy CT products. **Key words:** X band; Small Focal Spot; Accelerator

Received date: 03 Sep. 2023; Revised date: 11 Feb. 2024

Foundation item: Science and Technology Plan Project of Sichuan Province (2021YJ0518)

[†] Corresponding author: LIU Yongtao, E-mail: lytao@foxmail.com