

新型分布式X射线管屏蔽结构研究

唐华平^{1,2} 陈志强¹ 李国宇² 何武² 王彪² 赖生²

1(清华大学 工程物理系 北京 100084)

2(新鸿电子有限公司 常州 213000)

摘要 不同于传统单焦点X射线管的结构特征,分布式多焦点X射线管的辐射防护和屏蔽设计需要开展针对性研究。本文采用蒙特卡罗模拟计算方法对分布式多焦点X射线管的辐射场和屏蔽结构进行模拟和研究,模拟计算结果表明分布式多焦点X射线源具有线源特性,提出了各屏蔽面特别是沿焦点分布方向采用均匀厚度的屏蔽体设计方法。通过模拟各屏蔽面在不同屏蔽厚度下的漏剂量率水平,设计了一款各面分别为5~6 mm等厚的铅屏蔽结构并与X射线管装配,在阳极高压160 kV、阳极电流15 mA条件下,开展漏剂量率测试与屏蔽性能评估。结果表明,对新型分布式X射线管,在各屏蔽面特别是焦点分布方向上采用均一厚度的屏蔽设计是可行的;各点位的实际测量与蒙特卡罗模拟计算结果偏差小于25%,偏小为主,一致性较好;漏剂量率较大的点位在前下中部和后下中部,分别为 $2.4 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $2.92 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,顶底和左右的漏剂量率分别低于 $2 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $1 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$;X射线管采用各面均匀厚度的屏蔽结构后,各点位的漏剂量率均满足低于 $5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 的漏剂量率限值要求。

关键词 分布式X射线管, 屏蔽结构, 蒙特卡罗仿真设计, 线源特性, 漏剂量率

中图分类号 TL99

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250040

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250040

The shielding design of distributed X-ray tube

TANG Huaping^{1,2} CHEN Zhiqiang¹ LI Guoyu² HE Wu² WANG Biao² LAI Sheng²

1(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2(NuRay Technology Company Limited, Changzhou 213000, China)

Abstract [Background] Different from traditional single-focus X-ray tubes, distributed X-ray tubes with multiple focal spots require targeted research on radiation protection and shielding design. [Purpose] This study aims to design and validate an effective shielding structure for distributed X-ray tube with uniform thickness to ensure radiation safety. [Methods] Firstly, Monte Carlo simulation was performed to analyze the radiation field characteristics of a 45-focal-spot distributed X-ray tube operating at 160 kV anode voltage and 15 mA anode current. Then, the leakage dose rates were calculated for lead shielding thicknesses ranging from 1 mm to 6 mm on all shielding surfaces. Finally, a shielding structure with uniform thickness of 5~6 mm on each surface was designed and assembled with the X-ray tube for experimental validation. [Results] The simulation results show that the distributed X-ray source exhibits line-source characteristics. The designed shielding structure with uniform thickness of 5~6 mm

国家自然科学基金(No.12327809)资助

第一作者: 唐华平, 男, 1976年出生, 2002年于清华大学获硕士学位, 研究领域为电子直线加速器和碳纳米阴极X射线源

通信作者: 陈志强, E-mail: czq@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-01-23, 修回日期: 2025-09-01

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12327809)

First author: TANG Huaping, male, born in 1976, graduated from Tsinghua University with a master's degree in 2002, focusing on electron linear accelerator and carbon nanotube cathode X-ray sources

Corresponding author: CHEN Zhiqiang, E-mail: czq@mail.tsinghua.edu.cn

Received date: 2025-01-23, revised date: 2025-09-01

lead on each surface achieves leakage dose rates below $5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at all measurement points. The deviation between simulation and actual measurements is consistently below 25%, with most measured values being lower than simulated ones. The highest leakage rates of $2.4 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ and $2.92 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ occur at the front lower middle and rear lower middle positions, respectively, which is consistent with the line-source characteristics and reflection target structure. **[Conclusions]** The uniform thickness shielding design proposed in this study is feasible and effective for distributed X-ray tubes. The Monte Carlo simulation method can reliably guide the shielding structure design, and all measurement points meet the radiation protection requirement of leakage dose rate below $5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$.

Key words Distributed X-ray tube, Shielding structure, Monte Carlo simulation, Line-source characteristic, Leakage dose rate

近年来,新型多焦点分布式X射线管使辐射成像技术发生重大变革,引起广泛关注和研究。得益于X射线的高穿透性及不同材料对X射线衰减的差异性,X射线辐射成像能够获得物体内部信息,广泛应用于医疗、安检和无损检测等领域。多焦点分布式X射线管是指在一个真空射线管腔体内分布有多个焦点的X射线管,其中每个焦点能够独立可控地产生X射线^[1]。根据多焦点分布式X射线管构建的辐射成像系统可以从不同的角度对同一检测对象进行透视成像,无需射线源移动可实现检测对象的快速三维成像,如静态计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)系统^[2],避免了传统高速滑环机械结构带来的影响,具有更好的稳定性、更高的检测速度和效率,优势明显,引起众多机构的争相研究^[3-6]。

屏蔽结构是X射线管安全应用的重要保障,对工程实践的顺利实施起着关键作用,现有的屏蔽结构设计通常依据国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)报告图表参数指导,并结合X射线衰减的经验公式进行计算^[7-8],或者采用蒙特卡罗建模计算作为指导^[9-10]。当前的辐射屏蔽研究都是针对单焦点的X射线源,通常以焦点为圆心,依据X射线在各角度方向的不同能谱分布和强度分布^[11],进行计算或者模拟,但是新型的多焦点X射线源,其工作模式和屏蔽结构与单焦点X射线源具有明显的差异。

不同于单点X射线源,多焦点分布式X射线源由于X射线的发射位置非点源分布特性,其屏蔽设计和性能研究是一项全新课题。这种源具有非圆心的特点,接近于放射源的线源特性^[12-14],但是其X射线发射方式又不等同于线源的均匀线状分布,而是断断续续的点状,因此其屏蔽设计方法需要开展针对性的研究。

本文采用蒙特卡罗模拟计算方法研究了45焦点分布式X射线管在各焦点依次轮换工作模式下的射线辐射场型态,具有线源特性,提出了一种在焦点分布方向上采用等厚度屏蔽层的屏蔽结构设计方

法。以铅作为屏蔽材料,研究各面采用等厚设计时,不同铅屏蔽厚度下X射线管漏剂量率的面分布情况,评估各面等厚屏蔽方法对分布式X射线源的屏蔽效果,以及满足辐射防护剂量限值 $5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (国家标准GBZ 127—2002)所需的铅屏蔽厚度。据此设计铅屏蔽结构并与X射线管装配,开展X射线管表面漏剂量率实际测量,并与模拟计算结果对比,验证了采用均匀等厚屏蔽方法对新型分布式X射线管进行屏蔽设计的安全有效性。本文工作为分布式X射线管屏蔽设计研究探索了新的技术方法,为该类产品工程应用的辐射安全设计提供了可靠方案。

1 分布式X射线管

在本研究中,开展铅屏蔽设计研究的分布式X射线管具有45个焦点,并以直线分布的形式排布在一个长条形阳极上^[15],位于矩形框体结构内,实物如图1所示。除矩形主体结构外,还包括圆桶形的高压连接结构和油冷连接结构,以及排气管、离子泵等附属部件。

1.1 分布式X射线管结构建模

分布式X射线管的结构示意图如图2所示,直线型等间距排列的45个阳极焦点,整体为左右对称结构,定义中心焦点位置为原点 O ,建立 X - Y - Z 坐标系,将X射线出射方向称为前向。为了降低蒙特卡罗计算难度并提高计算效率,简化计算模型,不考虑排气管、离子泵、引线端子等附属部件。

屏蔽结构位置如图2所示,前面、后面、顶面、底面、侧面离焦点中心 O 的距离分别为94 mm、81 mm、254 mm、178 mm、362 mm。

1.2 分布式X射线管的工作参数

分布式X射线管在高压发生器提供阳极正高压,专门开发的多通道恒流控制设备(Electron Control System, ECS)对不同阴极进行控制,油冷机对阳极进行实时冷却,离子泵控制器维持射线管内部的高真空状态,X射线管工作系统与设备搭建如

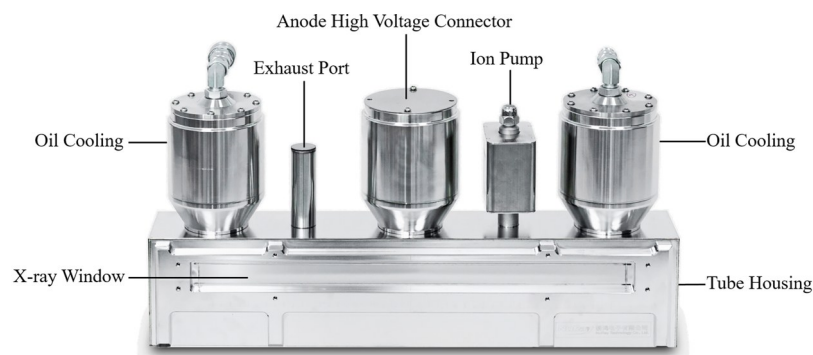


图1 分布式X射线管结构图
Fig.1 Structure diagram of the distributed X-ray tube

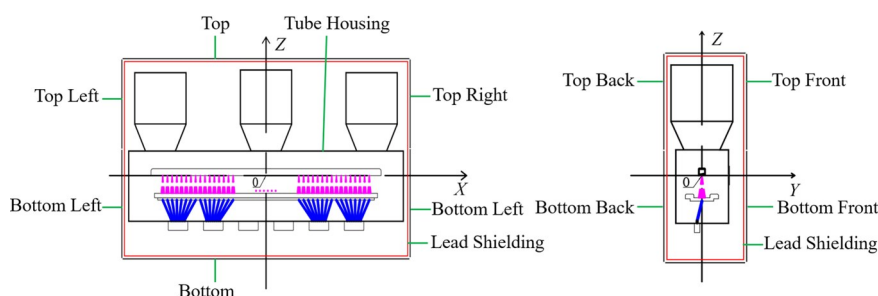


图2 45焦点分布式X射线管示意图
Fig.2 Schematic diagram of the distributed X-ray tube with 45 focal spots

图3所示,工作参数如表1所示。

2 蒙特卡罗模拟设计

基于图2所示的分布式X射线管结构模型,在红色线框位置设置屏蔽结构,屏蔽材料为铅,在屏蔽结构外表面上设置剂量采样点位。在本模拟中,建立多焦点X射线管阴极结构模型,采用电子轰击阳极靶产生X射线的方式,电子源参数设置如表1所示,阳极靶材料设置为钨,160 keV的电子束在45个焦点位置进行轰击产生带有钨特征峰和韧致辐射的X射线^[16-19]。由于蒙特卡罗计算程序难以一次性设置多个不同位置电子源依次轰击阳极靶产生X射线的情况,因此在计算中编写了45个程序,每个程序设置一个电子源工作,通过45个焦点分摊15 mA电流的方式,实现2.4 kW的运行功率,最后采用叠加的方式进行数据处理。通过模拟计算,得到了平均能量约为110 keV,出射角度和分布符合线源特性的X射线辐射场。然后在射线管外侧6个面采用均匀厚度进行屏蔽,当各个面的铅屏蔽厚度分别为1~6 mm时,在各个面均选取靠近中心点(图2中的O点)的位置处的漏剂量率进行分析,将各位置的漏剂量率随着铅厚度的衰减曲线作图,结果如图4所示。

可以看出,160 kV的X射线管的屏蔽体每增加1 mm厚度的铅,漏剂量率约衰减至1/10。以 $5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 的漏剂量率限值做标线,各面所需的屏蔽厚度为4~6 mm可满足辐射防护要求。

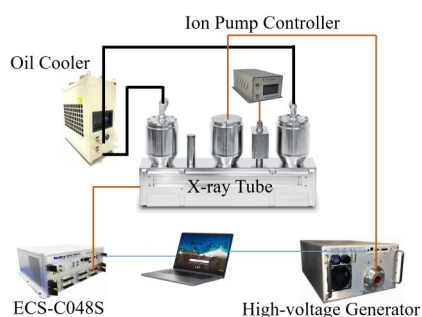


图3 分布式X射线源系统构成
Fig.3 Configuration of the distributed X-ray tube system

表1 分布式X射线源工作参数
Table 1 Parameters of distributed X-ray tube

项目 Item	参数 Technical data
最大阳极电压 Maximum anode voltage / kV	160
最大阳极电流 Maximum anode current / mA	15
连续运行功率 Continuous operation power / kW	2.4
焦点数量 Number of focal spots / pcs	45
单点工作脉宽 Single point working pulse width / μs	50~2 000

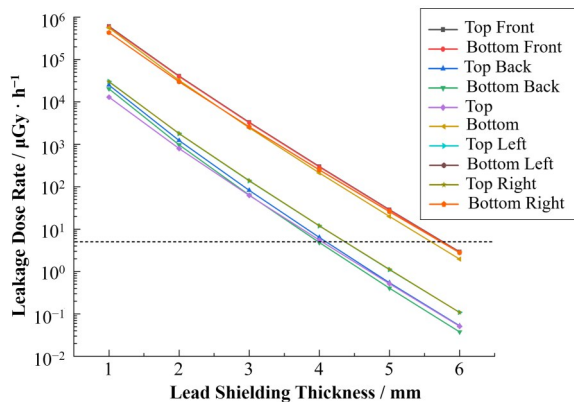


图4 漏剂量率随着铅厚度的衰减图(彩图见网络版)
Fig.4 Variation of leakage dose rate with lead thickness (color online)

根据图4蒙特卡罗计算结果,沿焦点分布方向采用相同厚度的铅进行屏蔽,进一步在具有一定面积的另一屏蔽面也采用相同厚度的铅,简化了屏蔽结构设计、加工和装配的难度。考虑一定的安全冗余后,各面设计的铅屏蔽层厚度如表2所示。

在如表2所示的铅屏蔽厚度下,蒙特卡罗计算得出各面的漏剂量率均能满足 $5\text{ }\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 的要求,展示前面、底面、后面的漏剂量率,其面分布特性如图5所示。图中的每一个小方块即是每一个探测器,将整个面切分成细小的面块,统计经过该面的漏X

表2 不同位置的铅屏蔽层厚度
Table 2 Thickness of lead shielding layer at different locations

位置 Location	铅屏蔽厚度 Lead shielding thickness / mm
顶面 Top	5
底面 Bottom	6
前上 Top front	6
前下 Bottom front	6
后上 Top back	5
后下 Bottom back	5
左上 Top left	5
左下 Bottom left	6
右上 Top right	5
右下 Bottom right	6

射线。由于蒙特卡罗计算存在相对误差,这些相对误差会导致计算结果出现波动,因此分布图的边沿呈现出参差不齐的形状。

从图5中可以看出,前、后面板位置最大漏剂量率出现在焦点下方3~5 cm的区域,底面、前上、前下、左下、右下面板屏蔽厚度均为6 mm,大于顶面、后上、后下、左上、右上面板的5 mm屏蔽厚度,这与射线管采用反射靶结构,前向和下侧的X射线产额较高是相符的;在阳极焦点分布长度方向上,每个区

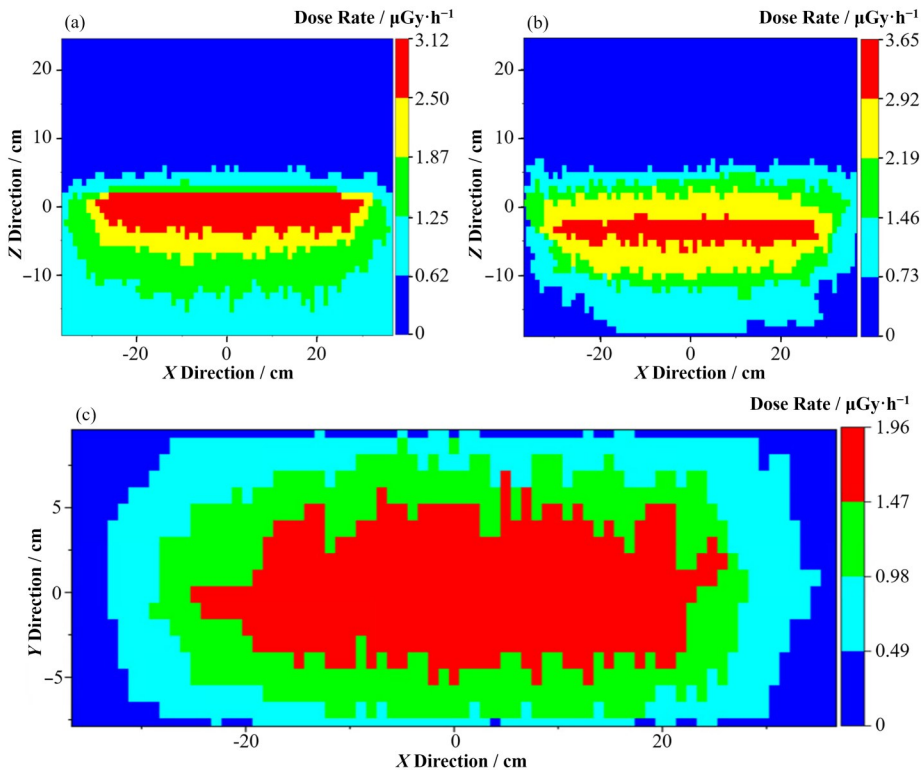


图5 不同位置铅厚度的漏剂量率分布(彩图见网络版) (a) 前面,(b) 后面,(c) 底面
Fig.5 Distribution of leakage dose rate at different surfaces with various lead shielding thicknesses (color online)
(a) Front, (b) Back, (c) Bottom

域采用厚度均匀的屏蔽结构就可以实现符合安全目标的屏蔽效果,这体现了45焦点分布式X射线源具有线源的特性;在长形阳极的两端位置,漏剂量率较中部位置偏低,体现出线源端部的截断效应。

3 分布式X射线管屏蔽结构设计及测试

依据蒙特卡罗模拟计算结果,在分布式X射线管外侧,按表2所示的各区域铅屏蔽厚度进行射线管的屏蔽结构设计,在屏蔽结构完成加工制作后,与分布式射线管进行装配,依据表1所示的标准工作参数,设定实际工作参数为阳极电压160 kV,阳极电流15 mA(每个焦点脉冲宽度95 μs ,脉冲间隔5 μs ,脉冲电流设定为15.8 mA,45个焦点依次轮流工作,多次循环)进行泄漏率测试,检验屏蔽结构的辐射防护效果。

3.1 屏蔽结构设计

屏蔽结构设计需考虑加工、装配的便利性和可行性,屏蔽结构的设计与装配过程如下:1)在射线管外侧构建方形六面体,在六面体的棱位置设计结构框架;2)在射线管两端设计厚度4 mm的安装钢板用于射线管与框架结构的固定;3)顶面、后上、后下、左上和右上位置设计厚度5 mm的铅板;4)前上、前下、底面、左下、右下、后下位置设计6 mm的铅板;5)在连接线缆、冷却油管穿越的部位,从外侧补充适当的迷宫结构,最终得到的屏蔽结构示意图如图6所示。

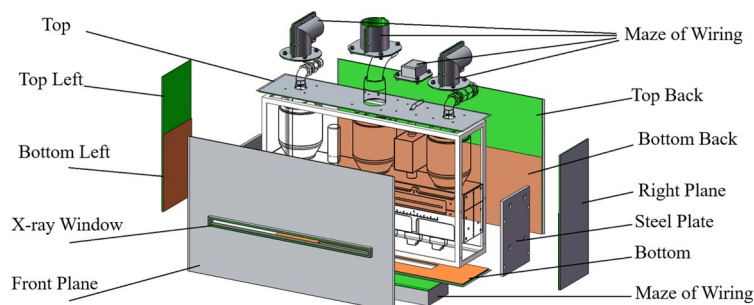


图6 分布式X射线管的屏蔽结构设计图(彩图见网络版)

Fig.6 Shielding structure design diagram of the distributed X-ray tube (color online)

表3 铅屏蔽后剂量分布的仿真值和实际测量值对比

Table 3 Comparison of simulated and actual measured dose distribution after lead shielding

位置 Location	前上 Top front	前下 Bottom front	后上 Top back	后下 Bottom back	顶面 Top	底面 Bottom	左上 Top left	左下 Bottom left	右上 Top right	右下 Bottom right
仿真剂量率 Simulated dose rate / $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$	2.24	3.12	2.65	3.65	1.67	1.96	0.49	1.19	0.5	1.20
测量剂量率 Measured dose rate / $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$	1.72	2.4	2.23	2.92	1.42	1.95	0.51	0.98	0.52	0.96
测量与仿真偏差 Deviation between measurement and simulation	-23%	-23%	-16%	-20%	-15%	-1%	4%	-18%	4%	-20%

实际加工与装配中,面铅板拼装的棱角位置难以实现无缝拼装,因此,在结构框架的棱内侧进行贴铅条,实现对拼接缝隙和装配螺钉的封堵,保障辐射防护效果。

3.2 辐射防护效果测试

屏蔽测试时将主束口用屏蔽工装封闭,工装采用8 mm厚的铅皮,与主束窗口四周重叠约40 mm。开启X射线源,采用电离辐射监测仪F451p,在距离屏蔽体5 cm处,进行巡检测量,分区记录数据。漏剂量率测试结果如图7所示,其中右面板和左面板基本相同,未单独标出。测试数据结果表明距离屏蔽体外5 cm处的漏剂量率均小于5 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,达到预定辐射防护目标。

选取前后、左右、顶底等具有典型代表意义的点位,比较漏剂量率的实际测量值和蒙特卡罗模拟计算值,数据对比如表3所示。

由表3可以看出,45焦点分布式X射线管的实际测量结果与仿真计算结果的偏差在25%以内,说明蒙特卡罗仿真计算方法能够指导X射线管辐射防护与屏蔽结构的开发与设计工作。

实际测量结果与计算结果存在差异,其原因主要可能是模拟计算中简化的顶部高压连接结构、油冷连接结构、排气管、离子泵等附属部件,以及屏蔽的固定框架和翻边迷宫等结构,实际对射线形成了阻挡,使得实际测量值大部分偏小,且不同部位之间的偏差略有不同。蒙特卡罗仿真计算结果和实际测试结果显示了45焦点分布式X射线管的漏剂量率

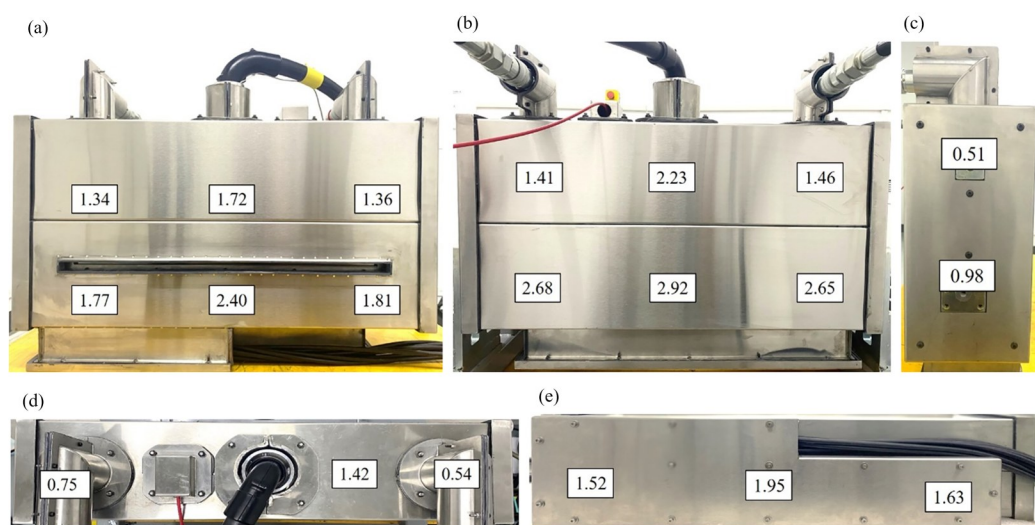


图7 各面测量点的漏剂量率图 (a)前面板,(b)后面板,(c)左面板,(d)顶面板,(e)底面板

Fig.7 Distribution of leakage dose rate at different surface measurement points (a) Front, (b) Back, (c) Left, (d) Top, (e) Bottom

都低于 $5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, 满足辐射屏蔽结构设计要求, 符合辐射防护剂量率限值标准。

4 结语

本文采用蒙特卡罗仿真计算方法建立45焦点分布式X射线管计算模型, 研究其X射线场的线源分布特性, 并提出各面特别是沿焦点分布方向采用均匀等厚的屏蔽设计方法。通过建立各面均匀厚度的屏蔽体模型, 模拟计算研究各面厚度与漏剂量率的关系, 发现不同部位的铅屏蔽结构厚度在4~6 mm就能满足漏剂量率低于 $5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 的漏剂量率限值要求。依此设计并加工了各面具有均匀厚度, 不同面厚度分别为5~6 mm的屏蔽体结构, 通过装配和实测表明: 各处的漏剂量率均小于 $5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 的辐射防护剂量率限值标准, 达到了辐射防护设计目标; 验证了对分布式X射线源采用各面等厚, 特别是沿焦点分布方向进行等厚度屏蔽设计的可靠性, 这简化了屏蔽体设计、加工、装配的难度。漏剂量率最大出现在前下和后下的中部, 分别为 $2.4 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $2.92 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, 符合多焦点分布式X射线管的线源特性和反射靶结构特点。对比实测与仿真结果, 偏差小于25%, 结果一致性较好, 表明采用蒙特卡罗仿真设计新型分布式X射线管屏蔽结构是可行的。本研究探索了新型分布式X射线管的屏蔽技术, 提出了各面, 特别是沿焦点分布方向进行等厚度屏蔽体设计的方法, 为新型X射线管辐射防护研究领域提供技术和经验参考。

作者贡献声明 唐华平进行了分布式X射线源辐射场特性的类线源特性研究, 提出了沿焦点分布方向

采用等厚屏蔽设计的方法, 指导蒙特卡罗模拟计算和屏蔽结构设计工作, 实施了文稿的主要撰写; 陈志强指导了研究过程中的技术问题, 包括蒙特卡罗模拟计算的物理模型和结果分析; 李国宇负责分布式X射线管屏蔽结构的研制, 并参与装配测试验证; 何武、王彪进行了射线源系统的搭建与屏蔽结构的装配、测试和数据分析; 赖生进行了蒙特卡罗模拟计算的建模和仿真分析, 以及数据的整理和分析, 参与文稿的撰写。

参考文献

- 唐华平. 分布式X射线源的发展历史和最新进展[J]. 真空电子技术, 2023(6): 1 - 9. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485.
TANG Huaping. History and recent advances of distributed X-ray sources[J]. Vacuum Electronics, 2023 (6): 1 - 9. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485.
- 金鑫, 张思远, 李亮, 等. 一种基于双平面扫描方式的双能静态CT系统[J]. CT理论与应用研究, 2020, 29(1): 31 - 37. DOI: 10.15953/j.1004-4140.2020.29.01.04.
JIN Xin, ZHANG Siyuan, LI Liang, *et al.* A dual-energy stationary CT system based on dual-plane scanning mode [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2020, 29(1): 31 - 37. DOI: 10.15953/j.1004-4140.2020.29.01.04.
- Puett C, Inscoe C, Lee Y Z, *et al.* Phantom-based study exploring the effects of different scatter correction approaches on the reconstructed images generated by contrast-enhanced stationary digital breast tomosynthesis [J]. Journal of Medical Imaging, 2018, 5(1): 1. DOI:

- 10.1117/1.jmi.5.1.013502.
- 4 Schwoebel P R, Boone J M, Shao J. Studies of a prototype linear stationary X-ray source for tomosynthesis imaging[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2014, **59**(10): 2393 – 2413. DOI: 10.1088/0031-9155/59/10/2393.
- 5 Park J, Jung J, Gupta A P, *et al.* Multi-beam X-ray sources with carbon nanotube emitter for tomosynthesis system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, **11312**: 113122E. DOI: 10.1117/12.2550142.
- 6 Tan C J, Tang C X, Huang W H, *et al.* Beam simulation and experiment of multi-focal spot electron Gun for distributed X-ray sources[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, **920**: 43 – 49. DOI: 10.1016/j.nima.2018.11.039.
- 7 张利, 陈旒, 曾德高. 不同方法对 X 射线机房的屏蔽优化分析 [J]. *中国卫生产业*, 2015, **12**(15): 79 – 82.
ZHANG Li, CHEN Ni, ZENG Degao. Different methods of X-ray room shielding optimization analysis[J]. *China Health Industry*, 2015, **12**(15): 79 – 82.
- 8 郑琳子. 工业 X 射线探伤室辐射屏蔽计算方法探讨[J]. *工业安全与环保*, 2020, **46**(11): 89 – 92. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2020.11.022.
ZHENG Linzi. Study on the radiation shielding calculation method for industrial X-ray radiography room [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2020, **46**(11): 89 – 92. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2020.11.022.
- 9 刘睿, 于华伟, 祝倩, 等. X 射线密度测井屏蔽体的蒙特卡罗模拟研究[J]. *核技术*, 2024, **47**(8): 080202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080202.
LIU Rui, YU Huawei, ZHU Qian, *et al.* Monte Carlo simulation analysis of X-ray density logging shields[J]. *Nuclear Techniques*, 2024, **47**(8): 080202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080202.
- 10 朱忠华, 罗威, 柴凡超, 等. 医疗诊断 X 射线场的 MC 模拟及复合屏蔽材料优化设计[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2019, **42**(2): 169 – 172. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2019.02.010.
ZHU Zhonghua, LUO Wei, CHAI Fanchao, *et al.* MC simulation of medical diagnostic X-rays and optimization design of composite shielding materials[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2019, **42**(2): 169 – 172. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2019.02.010.
- 11 Yang H W, Xun T, GAO J M, *et al.* X-ray shielding estimations for rep-rate high power microwave accelerators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, **30**(7): 073005. DOI: 10.11884/HPLPB201830.170532.
- 12 王研, 刘鑫, 黄万霞, 等. 线焦点 X 射线源成像[J]. *物理学报*, 2016, **65**(21): 219501. DOI: 10.7498/aps.65.219501.
WANG Yan, LIU Xin, HUANG Wanxia, *et al.* Line focal X-ray source imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(21): 219501. DOI: 10.7498/aps.65.219501.
- 13 聂星辰, 李佳, 赵平辉, 等. 深穿透屏蔽计算中 MCNP 减方差技巧应用及比较[J]. *核电子学与探测技术*, 2016, **36**(7): 729 – 733. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.07.016.
NIE Xingchen, LI Jia, ZHAO Pinghui, *et al.* Application and comparison of MCNP variance reduction techniques for deep penetration shielding calculation[J]. *Nuclear Electronics Detection Technology*, 2016, **36**(7): 729 – 733. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.07.016.
- 14 Tang H P, Lai S, Li G Y, *et al.* Research on the characteristics of radiation field of multi-beam X-ray source[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2026, **10**: s41605-026-00642-z. DOI: 10.1007/s41605-026-00642-z.
- 15 唐华平, 陈志强, 何武, 等. 160 kV 碳纳米管阴极分布式 X 射线管研制及应用探讨[J]. *真空电子技术*, 2024(4): 26 – 32. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2024.04.06.
TANG Huaping, CHEN Zhiqiang, HE Wu, *et al.* Development and application of a 160 kV distributed X-ray tube based on carbon nanotube cathodes[J]. *Vacuum Electronics*, 2024(4): 26 – 32. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2024.04.06.
- 16 李伟伟, 王立强. 反射式 X 射线管阳极钨靶的模拟优化设计[J]. *真空电子技术*, 2023(4): 26 – 31. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2023.04.05.
LI Weiwei, WANG Liqiang. Simulation optimization design of tungsten anode target in reflection type X-ray tubes[J]. *Vacuum Electronics*, 2023(4): 26 – 31. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2023.04.05.
- 17 赵扬. 基于 MCNP 方法的不同材料 X 射线谱分布模拟[J]. *材料科学*, 2023, **13**(12): 1095 – 1101. DOI: 10.12677/ms.2023.1312122.
ZHAO Yang. Simulation of X-ray fluorescence spectrum distribution in different materials based on monte carlo method [J]. *Material Sciences*, 2023, **13**(12): 1095 – 1101.

- DOI: 10.12677/ms.2023.1312122.
- 18 项安, 梁鲁, 陈瑞焄. X射线管足跟效应的蒙特卡罗模拟与分析[J]. 核技术, 2016, **39**(6): 060202. DOI: 10.11889.0253-3219.2016.hjs.39.060202.
- XIANG An, LIANG Lu, CHEN Ruitao. Monte Carlo simulation and analysis of X-ray tube's heel effect[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(6): 060202. DOI: 10.11889.0253-3219.2016.his.39.060202.
- 19 刘川凤, 李德红, 郝光辉, 等. 蒙卡方法对新型移动式低能X射线剂量特性研究[J]. 中国测试, 2024, **50**(9): 174 - 180. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2022070134.
- LIU Chuanfeng, LI Dehong, HAO Guanghui, *et al.* Research on the dosimetric characterize of the new mobile low energy X ray based on Monte Carlo[J]. China Measurement & Test, 2024, **50**(9): 174 - 180. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2022070134.