



核科学与工程

# 集装箱 CT 检查系统二维防散射滤线栅作用分析

邹 伟<sup>1</sup>, 朱国平<sup>1</sup>, 凌云龙<sup>1</sup>, 宗春光<sup>1,2</sup>, 刘必成<sup>1</sup>,  
易 茜<sup>1</sup>, 张一鸣<sup>1</sup>, 邓艳丽<sup>1</sup>, 李君利<sup>1,2</sup>

(1. 同方威视技术股份有限公司, 北京 100084; 2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

**摘 要:** 基于辐射成像系统蒙卡模拟软件 NucRPD, 对一款以 9 MeV 加速器作为辐射源的集装箱 CT 检查系统进行全系统蒙卡模拟, 并使用目标晶体笔标记法、散射部件标记法与断层图像计算法综合分析了位于探测器晶体前方的二维防散射滤线栅对散射 X 射线的压低作用。计算结果表明此款集装箱 CT 检查系统中二维防散射滤线栅对于降低散射 X 射线的作用有限, 后续在工程应用中无需使用二维防散射滤线栅, 这将极大降低后端集装箱 CT 检查系统探测器与旋转机架等部件的机械设计难度与工程实现成本。

**关键词:** 蒙卡模拟; 集装箱 CT 检查系统; 二维防散射滤线栅; NucRPD; 断层图像计算

中图分类号: TL99

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220421

## A simulation study of two-dimensional anti-scatter grid in container CT inspection system

Zou Wei<sup>1</sup>, Zhu Guoping<sup>1</sup>, Ling Yunlong<sup>1</sup>, Zong Chunguang<sup>1,2</sup>, Liu Bicheng<sup>1</sup>,  
Yi Xi<sup>1</sup>, Zhang Yiming<sup>1</sup>, Deng Yanli<sup>1</sup>, Li Junli<sup>1,2</sup>

(1. Nuctech Company Limited, Beijing 100084, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on Nuctech radiography Monte Carlo simulation software NucRPD, three methods are developed to analyze the effect of the two-dimensional anti-scatter grid in the container CT inspection system with a 9MeV accelerator: target crystal pen tag method, scattered component tag method, and tomography image reconstruction method. Calculation results of the three methods all show that the profit of the two-dimensional anti-scatter grid in reducing scattered X-rays in this container CT inspection system is limited. It is suggested that the two-dimensional anti-scatter grid not to be used in the subsequent engineering implementation, which will greatly reduce not only the mechanical design difficulty of the detector and rotating gantry, but also the engineering cost.

**Key words:** Monte Carlo simulation, container CT inspection system, two-dimensional anti-scatter grid, NucRPD, tomography image reconstruction

计算机断层扫描(CT)成像技术由于具有高质量的成像效果与直观的三维成像体验,已在医学影像检查<sup>[1]</sup>、行包安检<sup>[2-3]</sup>、无损检测<sup>[4]</sup>等多个领域得到了广泛应用。为了进一步提升 CT 成像系统图像重建效果,研究结果<sup>[5-8]</sup>表明,位于探测器前方的一维或二维防散射滤线栅能够有效降低探测器中散射 X 射线的贡献进而提高 CT 成像系统空间分辨率成像指标,并且通常情况下二维防散射滤线栅较于一维的防散射作用更佳<sup>[7-8]</sup>。

但以上研究结论主要针对以 X 光机作为辐射源的 CT 成像系统,而以加速器作为辐射源的相关研究非常匮乏,所以本文着重分析一款以 9 MeV 加速器作为辐射源的集装箱 CT 检查系统中二维防散射滤线栅所起的作用。基于辐射成像系统蒙卡模拟软件 NucRPD<sup>[9]</sup>,对此款集装箱 CT 检查系统进行几何建模并设计了三种统计分析方法:目标晶体笔标记法、散射部件标记法<sup>[10]</sup>与断层图像计算法,比较使用二维防散射滤线栅后探测器晶体笔能量沉积分布、各散射部件所占能量沉积比例、断层图像空间分辨率成像指标的变化。

\* 收稿日期:2022-12-22; 修订日期:2023-04-27

联系方式:邹 伟, zouwei@nuctech.com。

通信作者:李君利, lijunli@tsinghua.edu.cn。

## 1 集装箱 CT 检查系统简介

集装箱 CT 检查系统主要由加速器、探测器以及旋转机架组成,通过旋转机架带动加速器与探测器围绕集装箱 360°扫描形成正弦图,再通过重建算法重建出被检查集装箱的 CT 断层图像,图 1 为此款集装箱 CT 检查系统布置图。

### 1.1 加速器

系统采用一台 9 MeV 电子直线加速器作为辐射源,加速器通过能量为 9 MeV 的电子轰击钨靶后产生韧致辐射 X 射线,经过钨机头屏蔽与准直器约束后,可形成锥形 X 射线束流,图 2 为加速器结构示意图。

### 1.2 探测器

若干个探测器模块以加速器靶点为圆心排布在一个弧形探测器臂架上,每个探测器模块均由多排晶体组成,模块中间两排分别采用钨酸镨(CWO)晶体与钨酸铋(BGO)晶体,其余排晶体依次布置在中间两排晶体两侧,图 3 为每个探测器模块多排晶体布置示意图。

每个探测器晶体周围采用厚度为 0.5 mm 的钨材料列隔片,厚度为 0.3 mm 的钨材料行隔片,行列隔片长度与探测器晶体长度相同,图 4 为探测器晶体钨隔片结构示意图。

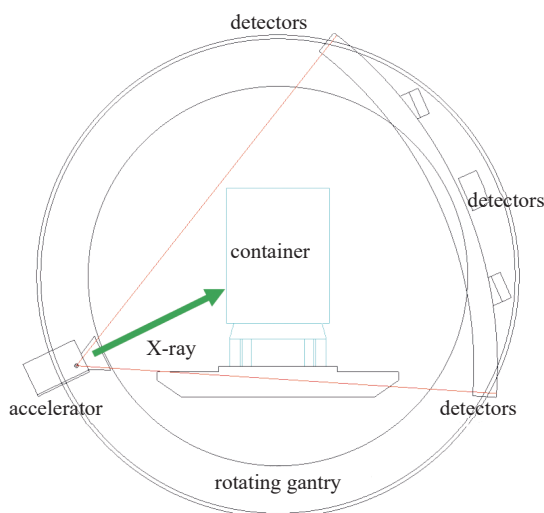


Fig. 1 Container CT inspection system scheme

图 1 集装箱 CT 检查系统布置图

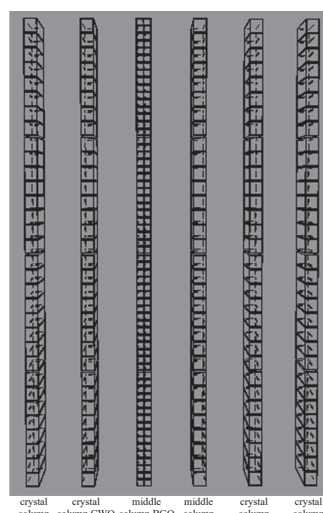


Fig. 3 Detector multi-column crystal layout

图 3 探测器多排晶体布置图

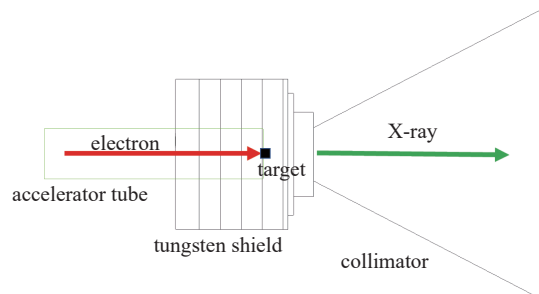


Fig. 2 Accelerator structure scheme

图 2 加速器结构图

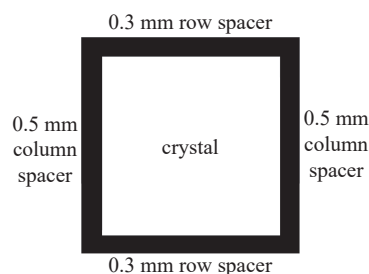


Fig. 4 Tungsten spacer scheme

图 4 钨隔片结构图

### 1.3 旋转机架

系统旋转机架采用滑环结构,将加速器与探测器分别挂载在被扫描集装箱的两端,并利用电机驱动此旋转机架进行旋转。

## 2 NucRPD 程序模型

### 2.1 几何模型

为了保证蒙特卡洛模拟的计算精度,本文严格按照集装箱 CT 检查系统的设计参数进行几何建模,其中加速器几何模型主要包含加速管、钨机头屏蔽与准直器,探测器模块几何模型包含两种探测器晶体、反射层、缓冲软垫、钨隔片、PCB 电路板、底座、外观盒等结构,旋转机架几何模型包含滑环与臂架结构,每个探测器模块以加速器靶点为

圆心均匀分布在臂架上, 图 5 为集装箱 CT 检查系统几何模型图。

### 2.2 二维防散射滤线栅

每个探测器晶体前方增加一个长度 20 mm、垂直方向厚度 0.5 mm、水平方向厚度 0.3 mm 的钨材料二维防散射滤线栅, 图 6 为每个探测器模块的二维防散射滤线栅几何模型图。

### 2.3 辐射源与物理模型

韧致辐射 X 射线的能量分布为连续能谱, 最高能量为 9 MeV, 图 7 为 X 射线能谱分布图。X 射线顶点位置分布服从二维高斯正态分布, 半高宽(FWHM)为 2 mm。物理模型采用 Geant4.10.7<sup>[11,12]</sup> 软件包中的 G4EmStandardPhysics 模型, 主要包含库伦散射、电离、韧致辐射、正电子湮灭、光电效应、康普顿散射、电子对效应等物理过程。

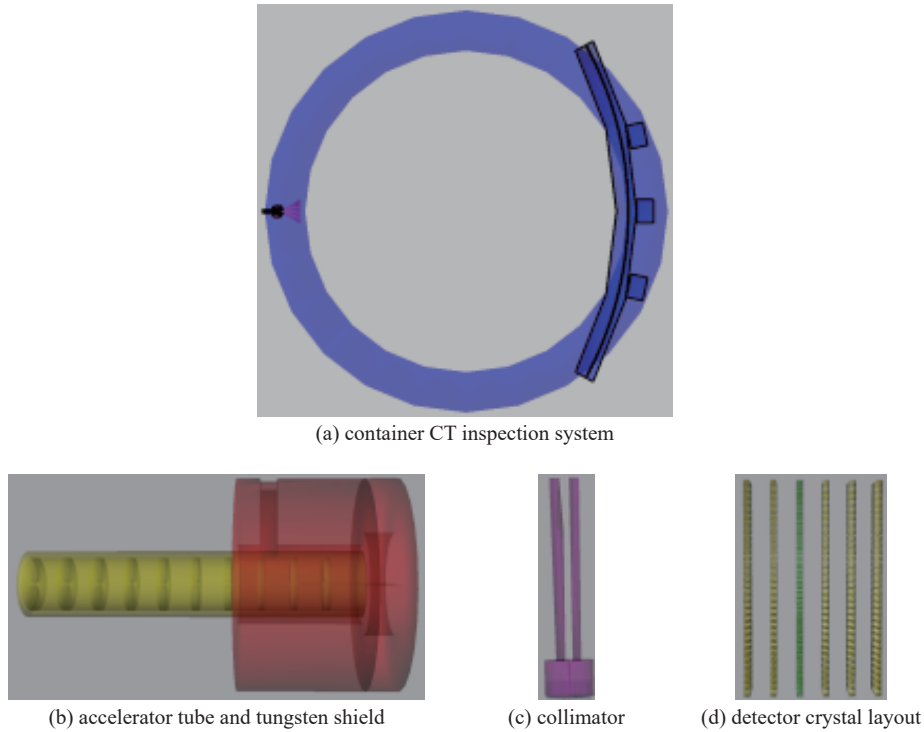


Fig. 5 Geometric model of container CT inspection system

图 5 集装箱 CT 检查系统几何模型图

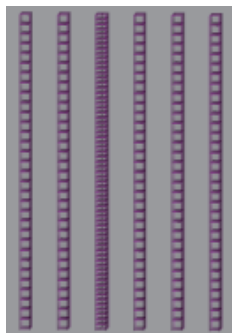


Fig. 6 Two-dimensional anti-scatter grid geometric model

图 6 二维防散射滤线栅几何模型图

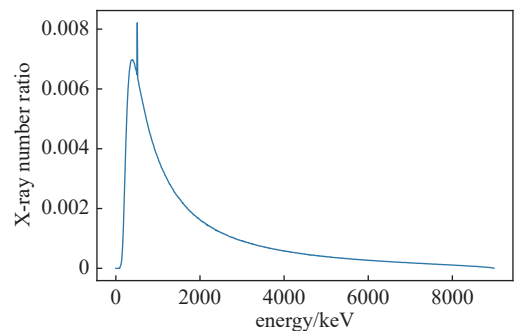


Fig. 7 X-ray energy distribution

图 7 韧致辐射 X 射线能谱分布图

### 2.4 统计方法

本文设计了三种统计方法用于分析二维防散射滤线栅压低散射 X 射线的作用。

目标晶体笔标记法: 在蒙卡模拟过程中同时发射一个与初始 X 射线相同动量方向的 Geantino 粒子, 该粒子会沿直线输运, 不与物质发生任何相互作用, 这表示 Geantino 粒子到达的晶体笔即为初始 X 射线预计到达的晶体笔。当 Geantino 粒子到达预设目标晶体笔时, 则该模拟事件被标记下来, 统计该蒙卡模拟事件中 X 射线在探测器晶体中形成的能量沉积分布。

散射部件标记法: 在蒙卡模拟过程中对 X 射线首次发生散射物理过程的部件进行标记, 部件主要包括同排探测器晶体、反射层、缓冲软垫、钨隔片、其同排探测器、PCB 电路板、外观盒、底座、其他部件(包含加速管、钨机头、准直器与旋转机架等), 统计蒙卡模拟事件中各个部件所占的能量沉积比例。

断层图像计算法: 在加速器与探测器之间放置 CT 系统测试模体, 此测试模体用于测量两侧厚度为 60 mm 钢板后的空间分辨率(2.0~5.0 mm)成像指标, 截面尺寸为 300 mm×500 mm, 图 8 为此 CT 系统测试模体几何模型图。利用此测试模体旋转等效代替 CT 系统旋转, 蒙卡计算此测试模体转动 360°后扫描形成的正弦图, 再通过滤波反投影重建算法<sup>[13-14]</sup>并结合每支探测器晶体笔三维坐标信息计算获得断层图像空间分辨率成像指标。

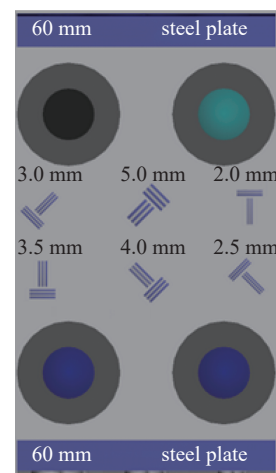


Fig. 8 CT test phantom geometric model

图 8 CT 系统测试模体几何模型图

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 目标晶体笔标记法

将尺寸为 1 m×1 m×1 m 的水箱放置在检查系统的几何中心处, 目标晶体笔设置为探测器中间排 CWO 与 BGO 晶体的中心位置晶体笔, 图 9 为有无二维防散射滤线栅目标晶体笔(索引值为 0)与同排周围 20 只晶体笔的能量沉积分布图, 左侧红色纵坐标代表每支晶体笔对目标晶体笔能量沉积的归一值, 右侧绿色纵坐标代表每支晶体笔有无二维防散射滤线栅的能量沉积相对变化值, 增加二维防散射滤线栅后晶体笔能量沉积最大相对变化分别为 19.44%(CWO 晶体)与 4.80%(BGO 晶体), 但此相对变化最大的晶体笔能量沉积仅为目标晶体笔的 1.20%(CWO 晶体)与 9.16%(BGO 晶体), 同时目标晶体笔能量沉积相对变化仅为 3.40%(CWO 晶体)与 1.66%(BGO 晶体), 这表明增加二维防散射滤线栅后 CWO 与 BGO 晶体的能量沉积分布没有出现明显变化。

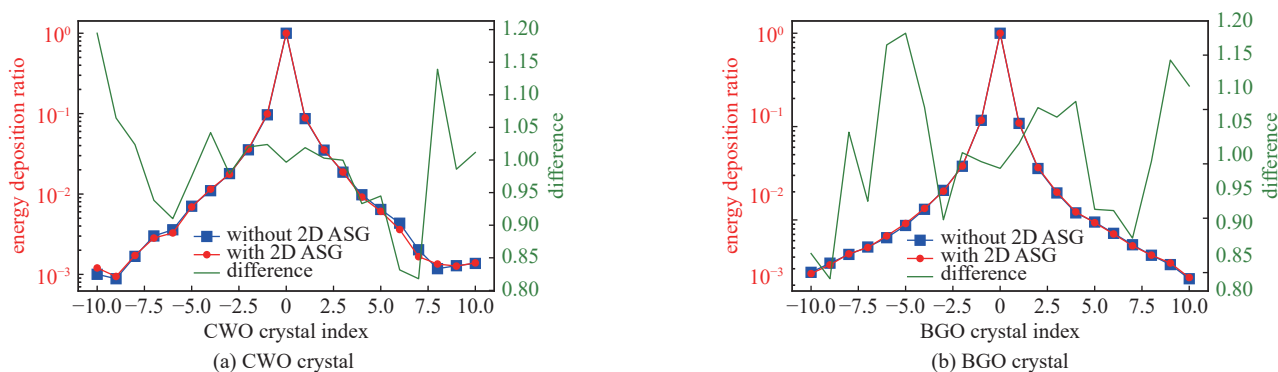


Fig. 9 Distribution of crystal energy deposition

图 9 探测器晶体能量沉积分布图

#### 3.2 散射部件标记法

将尺寸为 1 m×1 m×1 m 的水箱放置在检查系统的几何中心处, 对探测器中间排 CWO 与 BGO 晶体能量沉积的散射部件来源进行分类统计, 并将位于同排的晶体笔能量沉积进行求和后计算出各部件能量沉积比例, 表 1 为有无二维防散射滤线栅的各个部件能量沉积比例与差异计算结果, 增加二维防散射滤线栅后散射 X 射线能量沉积比例仅降低 0.77%(CWO 晶体)与 0.69%(BGO 晶体), 这表明增加二维防散射滤线栅后没有明显压低散射 X 射线引起的能量沉积比例。

#### 3.3 断层图像计算法

将 CT 系统测试模体放置在检查系统的旋转中心处, 图 10 与图 11 为探测器中间排 CWO 与 BGO 晶体的测试模体旋转 360°扫描正弦图。

利用滤波反投影法对扫描正弦图进行重建, 图 12 与图 13 为探测器中间排 CWO 与 BGO 晶体的 CT 系统测试模体断层重建图, 结果显示增加二维防散射滤线栅后空间分辨率成像指标仍为 4.0 mm(CWO 晶体)与 5.0 mm(BGO 晶体), 空间分辨率成像指标并没有提升。

表 1 散射部件能量沉积比例计算结果  
Table 1 Scattered component energy deposition ratio result

component	energy deposition ratio without 2D ASG/%		energy deposition ratio with 2D ASG/%		difference of with - without 2D ASG/%		
	CWO	BGO	CWO	BGO	CWO	BGO	
signal X-ray	crystals	52.95±0.06	54.60±0.04	53.72±0.06	55.29±0.04	0.77±0.08	0.69±0.06
	reflector	3.28±0.01	1.68±0.01	3.23±0.01	1.66±0.01	-0.05±0.01	-0.02±0.01
	tungsten spacer	15.29±0.03	13.65±0.02	13.19±0.02	12.13±0.01	-2.10±0.04	-1.52±0.02
	cushion	0.01±0.01	0.01±0.01	0.01±0.01	0.01±0.01	0.00±0.01	0.00±0.01
scattered X-ray	other rows	13.62±0.02	16.41±0.02	14.53±0.02	17.21±0.02	0.91±0.03	0.80±0.03
	PCB board	0.26±0.01	0.31±0.01	0.27±0.01	0.31±0.01	0.01±0.01	0.00±0.01
	base	0.11±0.01	0.26±0.01	0.11±0.01	0.26±0.01	0.00±0.01	0.00±0.01
	appearance box	1.19±0.01	1.36±0.01	1.04±0.01	1.31±0.01	-0.15±0.01	-0.05±0.01
	others	13.29±0.02	11.72±0.01	13.90±0.02	11.82±0.01	0.61±0.03	-0.10±0.01

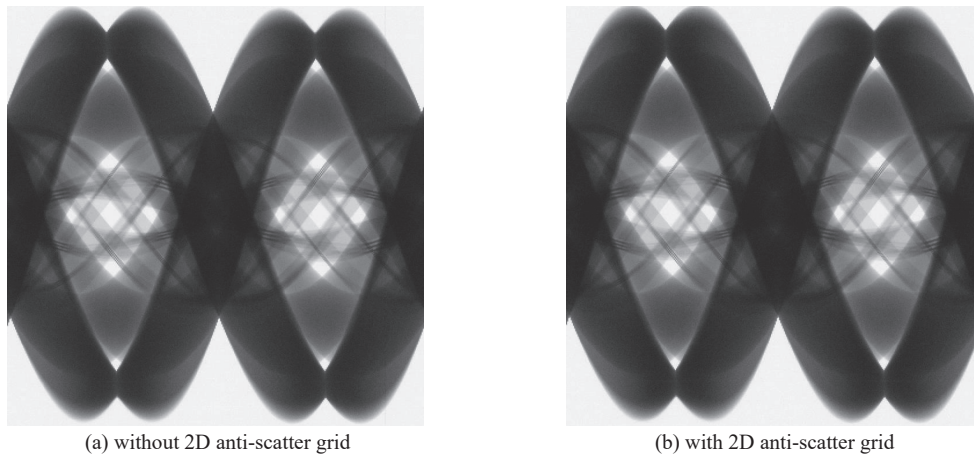


Fig. 10 CWO crystal test phantom scan sinograms  
图 10 CWO 晶体测试模体扫描正弦图

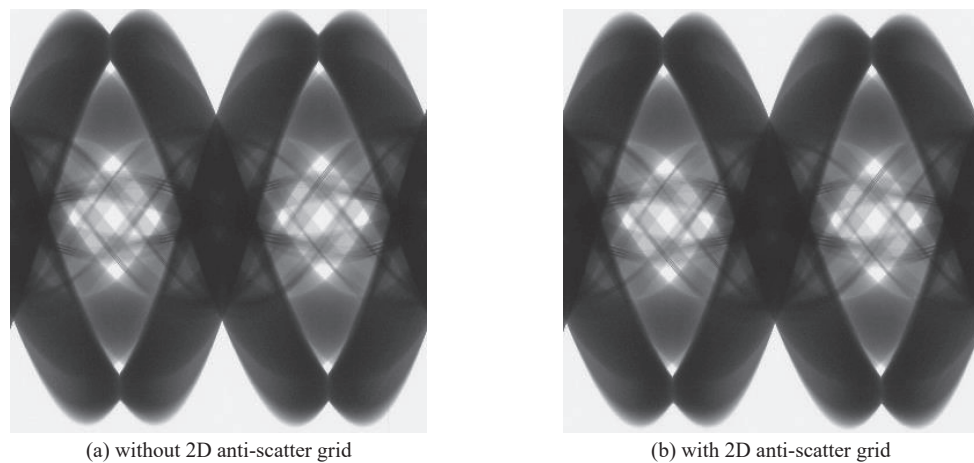
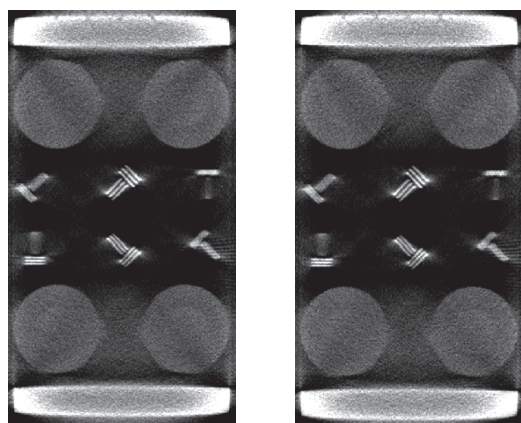


Fig. 11 BGO crystal test phantom scan sinograms  
图 11 BGO 晶体测试模体扫描正弦图

#### 4 结 论

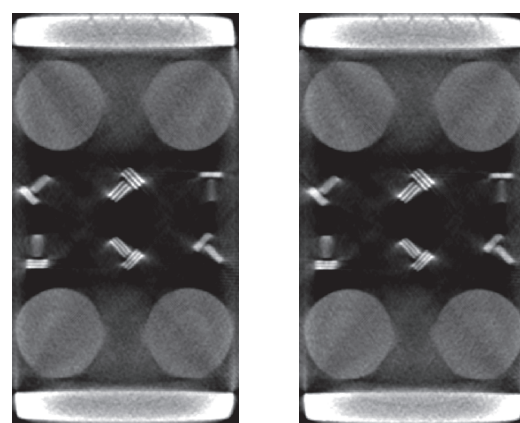
本文利用蒙特卡罗模拟方法针对一款集装箱 CT 检查系统中二维防散射滤线栅压低散射 X 射线的作用进行量化分析,结果表明此款集装箱 CT 检查系统在增加二维防散射滤线栅后无法明显改变 X 射线在探测器晶体笔中的能



(a) without 2D anti-scatter grid (b) with 2D anti-scatter grid

Fig. 12 CWO crystal test phantom CT reconstruction image

图 12 CWO 晶体测试模体断层重建图



(a) without 2D anti-scatter grid (b) with 2D anti-scatter grid

Fig. 13 BGO crystal test phantom CT reconstruction image

图 13 BGO 晶体测试模体断层重建图

量沉积分布,也没有明显降低散射 X 射线在探测器晶体中所占的能量沉积比例,同时断层重建图显示空间分辨率成像指标没有提升。三种分析方法均表明使用二维防散射滤线栅对于降低此款集装箱 CT 检查系统探测器中散射 X 射线的作用有限,所以此款集装箱 CT 检查系统在后续工程实现时无需使用二维防散射滤线栅,这对于降低 CT 检查系统机械设计难度和优化工程成本都具有重要意义。该结果也表明在工程应用中,必须对 CT 检查系统的设计参数进行综合分析后再确定二维防散射滤线栅的使用必要性。

#### 参考文献:

- [1] Rubin G D. Computed tomography: revolutionizing the practice of medicine for 40 years[J]. *Radiology*, 2014, 273(s2): S45-S74.
- [2] 李新斌,张丽,陈志强,等. 行包货物实时验放CT智能解决方案[J]. *CT理论与应用研究*, 2022, 31(5): 597-615. (Li Xinbin, Zhang Li, Chen Zhiqiang, et al. CT intelligent solution for real-time inspection and release of baggage and cargo[J]. *CT Theory and Applications*, 2022, 31(5): 597-615)
- [3] 唐利华,张国光,张健,等. 静态CT行包安检系统关键技术研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(5): 933-938. (Tang Lihua, Zhang Guoguang, Zhang Jian, et al. Research on key technology of static CT luggage security inspection system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(5): 933-938)
- [4] 先武,李时光,王珏. 最佳无损检测手段——工业CT技术的发展[J]. *光电工程*, 1995, 22(4): 51-58. (Xian Wu, Li Shiguang, Wang Jue. Development of the optimal nondestructive testing approach——industrial CT[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, 22(4): 51-58)
- [5] Alexeev T, Kavanagh B, Miften M, et al. Two-dimensional antiscatter grid: a novel scatter rejection device for cone-beam computed tomography[J]. *Medical Physics*, 2018, 45(2): 529-534.
- [6] Wu Zhifang, Liu Jinhui. Experimental research on rear collimator in  $\gamma$ -ray industrial CT[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, 67(7/8): 1216-1219.
- [7] Pratiwi E, Bae S, Lee H, et al. Collimators for gamma dual energy CT arch-detector: a simulation study[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2020, 76(1): 79-85.
- [8] Vogtmeier G, Dorscheid R, Engel K J, et al. Two-dimensional anti-scatter grids for computed tomography detectors[C]//*Proceedings of SPIE 6913, Medical Imaging 2008: Physics of Medical Imaging*. 2008: 691359.
- [9] 吴小刚,武祯,明申金,等. 辐射成像系统模拟软件NUCRPD的研发与应用[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 126003. (Wu Xiaogang, Wu Zhen, Ming Shenjin, et al. Development and application of the radiography simulation software NUCRPD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 126003)
- [10] 李君利,娄云,李鹏宇,等. Monte Carlo散射标记方法在辐射防护设计中的应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(s1): 947-950. (Li Junli, Lou Yun, Li Pengyu, et al. Monte Carlo sign-scatter method for radioprotection design[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2007, 47(s1): 947-950)
- [11] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Geant4 developments and applications[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(1): 270-278.
- [12] Asai M, Dotti A, Verderi M, et al. Recent developments in Geant4[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 82: 19-28.
- [13] Schofield R, King L, Tayal U, et al. Image reconstruction: part 1—understanding filtered back projection, noise and image acquisition[J]. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, 2020, 14(3): 219-225.
- [14] Tang Xiangyang, Hsieh J, Nilsen R A, et al. A three-dimensional-weighted cone beam filtered backprojection (CB-FBP) algorithm for image reconstruction in volumetric CT—helical scanning[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51(4): 855-874.