

MC 法校正高能 X 射线核燃料组件 无损检测系统散射

钟 挚, 何高魁, 张向阳

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:高能 X 射线无损检测技术能在不破坏检测物体的前提下获取其内部结构信息。核燃料组件的多棒束特性导致产生的散射射线严重影响检测图像质量。为了校正散射射线的干扰, 本研究分析了多种解决散射射线干扰的方法在核燃料组件无损检测中的局限性, 使用 Geant4 仿真模拟核燃料组件无损检测过程, 构建 ComptonFlag 类标记发生康普顿散射的散射射线并去除其干扰。模拟结果表明, 在去除散射射线干扰后, 投影图像中的缺陷与完整燃料棒的对比度信噪比提高了 69.02%, 能有效提升核燃料组件无损检测图像质量。

关键词:核燃料组件; 高能 X 射线无损检测; 散射; MC 法; Geant4

中图分类号:TL99 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-7512(2024)03-0274-06

doi: [10.7538/tws.2024.youxian.005](https://doi.org/10.7538/tws.2024.youxian.005)

Scattered Ray Correction for High-Energy X-Ray Nondestructive Testing System for Nuclear Fuel Assemblies Based on MC Method

ZHONG Zhi, HE Gaokui, ZHANG Xiangyang

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: High energy X-ray non-destructive testing technology can obtain the internal structure information of the inspected object without destroying it. The multi-rod-beam nature of nuclear fuel assemblies can lead to severe scattering ray effects, which can degrade image quality. In order to correct the interference of scattering ray, this study analyzed the limitations of various methods to solve the interference of scattered rays in the non-destructive testing of nuclear fuel assemblies. Geant4 is used to simulate the nondestructive testing process of nuclear fuel components, and ComptonFlag class is constructed to mark the scattered rays of Compton scattering and remove their interference. The simulation results show that the CNR of defective and intact components in the projection image is increased by 69.02% after the scattering ray interference is removed, which can effectively improve the image quality of non-destructive testing of nuclear fuel assemblies.

Key words: nuclear fuel assembly; high energy x-ray nondestructive testing; compton scattering; Monte Carlo method; Geant4

核燃料组件是核反应堆的关键部分, 为了保障核反应堆工作的稳定性和可靠性, 在运行

前必须精确检测核燃料组件的内部结构。传统方法检测燃料棒中的空洞和裂纹, 需要拆卸核

燃料组件,耗时长^[1-2]。高能X射线无损检测技术能在不损伤检测物体的情况下,清晰直观地获取其内部结构信息,在航空航天、汽车制造、电子设备、材料科学等领域已得到广泛应用^[3]。核燃料组件具有高效率钢厚度、多棒束等特点,因此面阵列探测器的投影数据采集过程中会统计到大量的额外散射射线,导致检测图像对比度降低,严重影响图像质量。目前常用的散射校正方法分为硬件校正法、软件校正法和软硬件结合校正法^[4]。但对于高能X射线源,常用的硬件校正法难以去除高能散射射线的影响。

本研究采用蒙特卡罗方法(monte carlo, MC),通过Geant4软件对核燃料组件无损检测系统进行建模,模拟发射X射线并统计探测器的计数,通过数据处理与重建,得到面阵列探测器的投影图像。通过调控Geant4软件标记散射射线,对校正散射射线干扰前后的检测效果,以实现高能X射线核燃料组件无损检测系统的散射射线校正。

1 无损检测系统

高能X射线核燃料组件无损检测系统示意图示于图1。整个系统由射线源系统、探测器系统、数据获取系统、机械控制系统、计算机系统等部分组成。射线源系统为9 MeV电子直线加速器加速电子轰击重金属靶产生高能X射线,使用准直器控制射束形状。为满足核燃料组件高效率、快速定位的实用化检测需求,探测器系统采用面阵列探测器快速扫描和线阵列

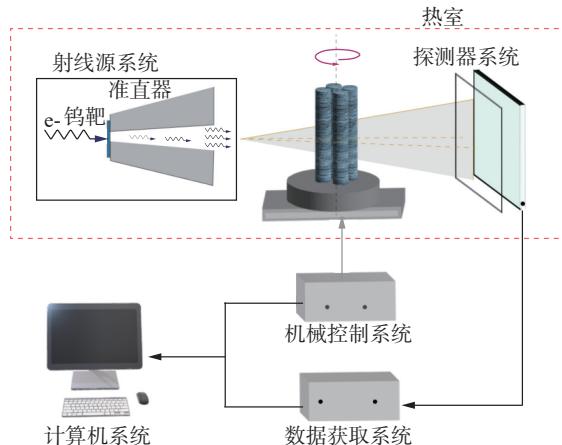


图1 高能X射线核燃料组件无损检测系统示意图
Fig.1 High energy X-ray non-destructive testing system for nuclear fuel assemblies

探测器层析成像结合的方案。面阵列探测器用于锥束快速扫描得到DR(digital radiography)投影图像,发现疑似缺陷区域后,通过线阵列探测器精细扫描获取疑似缺陷区域的断层扫描图像;数据获取系统统计探测器采集的信息并储存;机械控制系统控制待检测物体的旋转、加速器与探测器的位移;计算机系统处理统计的数据并实现图像的重建与分析。

2 散射校正

X射线与物质相互作用时除了被吸收之外,X射线散射也会导致射线束强度损失。散射光子干扰示意图示于图2,散射的光子在此过程中不会消失,仅能量与出射方向发生改变,表明散射光子可到达探测器并同透射光子一样沉积能量产生附加信号,散射射线引起的信号是造成图像退化的主要原因。

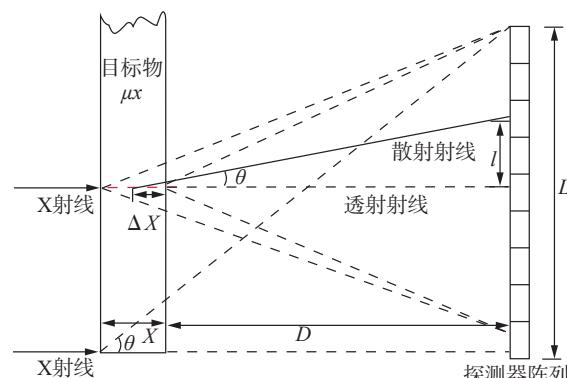


图2 散射光子干扰示意图

Fig.2 Scattered photon interference

散射射线的本质是康普顿光子,入射光子与自由电子弹性碰撞得到反冲电子和散射光子,通过能量守恒、动量守恒方程可得散射光子能量 E_1 与入射光子能量 E_0 和散射角 θ 的关系^[5]。

$$E_1 = E_0 / [1 + \alpha(1 - \cos \theta)] \quad (1)$$

其中, $\alpha = E_0 / (m_0 \cdot c^2)$, m_0 为静止电子质量。散射光子能量与散射角关系示于图3,随着入射光子能量升高,光子具有强烈的向前散射分布的趋势^[5]。图2中X射线的散射角大小为:

$$\theta = \arctan[L / (\Delta x + D)] \quad (2)$$

当9 MeV的X射线沿目标物中心入射,若 $L=500$ mm, $D=850$ mm, $x=150$ mm,散射角最大能达到探测器阵列的角度约为30°,到达探测器的

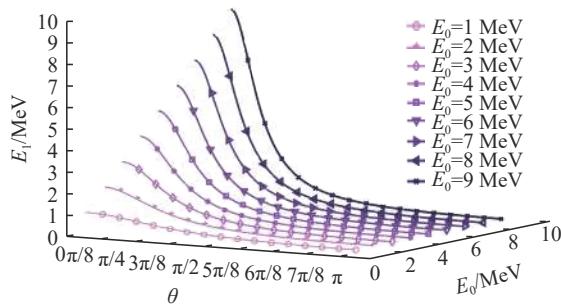


图 3 散射光子能量与散射角和入射光子能量的关系

Fig.3 The relationship between the scattering photon energy and the scattering angle and the incident photon energy

最低能量散射光子仍有 2.6 MeV, 此时在探测器阵列前增加滤波片^[6]用以减少散射射线干扰的作用有限。

射线阻止阵列(beam stop array, BSA)、射线阻止网络(beam stop grid, BSG)^[7-9]等衰减网格法由校正板的质量直接影响最终校正结果的好坏。原理上是通过校正板上的重金属材料对原透射的 X 射线进行完全衰减, 获得其他位置对该方向探测器散射光子的部分分布, 然后插值估计出散射分布。但对于高能 X 射线, 使用常规的校正板难以将 X 射线完全衰减, 因此衰减网格法等涉及硬件的散射校正方法难以适用于高能 X 射线核燃料组件无损检测系统中的面阵列探测器散射校正。

对待检测物体产生的散射发射到第 i 个探测器进行解析建模分析, 基于 K-N 公式^[10]可得到散射光子分布在探测器上的微分截面:

$$P_i = \frac{d\sigma_c}{d\Omega} = r_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \quad (3)$$

式中, $r_0 = 2.818 \times 10^{-15}$ m, 为经典电子半径; $\alpha = E_0/(m_0 \cdot c^2)$, P_i 为散射光子偏转角度 θ 发射到第 i 个探测器上某点的概率。在只考虑单次散射情况下对整个待检测物体 V 对于该点散射效应积分, 最后对第 i 个探测器区域 S 积分, 便能得到整个待检测物体对第 i 个探测器造成的散射干扰。

$$I = \int_S \int_V I_0 e^{-\mu(E_0)l_1} N_i \cdot P_i(E_0, \theta) \cdot e^{-\mu(E_1)l_2} dv ds \quad (4)$$

式中: l_1 、 l_2 为 X 射线与物体发生散射前后穿行

的路径; N_i 为单位体积内的电子数。针对简单几何结构的均匀介质物体, 刘建邦等^[11]基于 K-N 公式构建了散射校正模型。

MC 法随机模拟大量光子在核燃料组件中的径迹及物理过程, 以统计性的方式计算出光子在整个复杂结构中的传播和接收情况, 并且能够考虑多次散射事件, 从而提供更精确的结果。综上所述, MC 法是目前阶段实现精确散射校正最合适的方法。

3 MC 模拟

检测成像效果与各个分系统的每个环节息息相关, 射线束硬化、散射射线、探测器响应等都会影响到最终的成像效果^[3]。X 射线由高速电子轰击重金属靶发生韧致辐射而产生, 首先模拟 9 MeV 电子轰击重金属靶, 获得电子直线加速器产生的 X 射线能谱(图 4)。当 X 射线穿过高密度的核燃料组件时, 高能射线正常衰减, 低能射线被大量吸收, 出射射线的高能射线比例增高, 射线束硬化。探测器对不同能量的 X 射线的能量响应亦有差距, 导致最终获取的图像灰度不均匀。

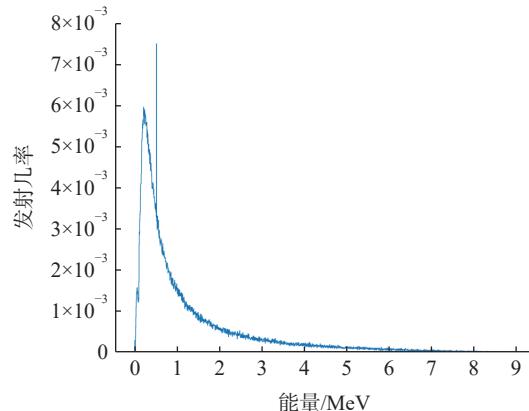


图 4 电子直线加速器 X 射线能谱

Fig.4 X-ray energy spectrum of electron linac

3.1 建模

为聚焦于 X 射线在核燃料组件散射给探测器造成的散射干扰对最终成像结果的影响, 面阵列探测器简化为由 1024×1024 个厚长宽为 $0.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 的 CsI 晶体组成。对于高能 X 射线 0.5 mm 厚的 CsI 晶体的探测效率较低, 考虑到计算能力有限, 为减小统计误差及排除能量响应对成像效果的干扰, 统计到达探测

器晶体表面的X射线的动能为在该晶体中沉积的能量,此时探测器可视为一个理想探测器。物理过程使用Geant4提供的G4EmStandardPhysics_option3模型。使用G4UserEventAction、G4UserSteppingAction类跟踪每个粒子实时的运动过程和物理过程信息,并创建ComptonFlag类标记发生散射的粒子。分别统计有散射、无散射射线干扰情况下的核燃料无损检测系统的检测效果。所建模型示于图5。

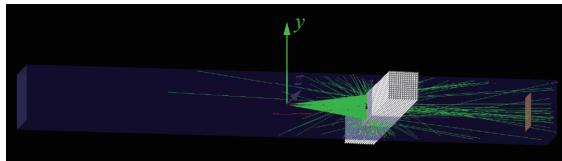


图5 高能X射线核燃料组件无损检测系统Geant4建模
Fig.5 High energy X-ray nondestructive testing system modeled in Geant4

3.2 模拟结果

在不放置燃料组件的条件下垂直于探测器方向发射 10^9 个X射线,统计探测器的计数,即能得到初始射线强度 I_0 ;在相同条件下放置完整核燃料组件,统计此时探测器的计数,从而获得衰减后的射线强度 I_1 ,计算得到核燃料组件在旋转角度为0°时的投影图像示于图6,图6可以清晰地观察到核燃料棒等间距排布。

模拟燃料棒内部出现缺陷情况,在燃料棒中心设置一个半径为2 mm的空气孔隙,X射线源发射 10^9 个光子,统计探测器上的能量沉积信息,经过数据转化得到缺陷检测的投影图像

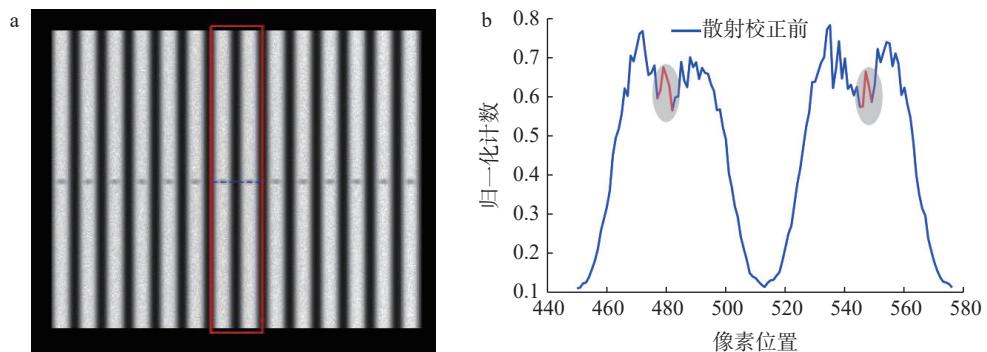


图7 散射校正前的缺陷组件投影图(a)及中间行灰度值(b)
Fig.7 The projection of the defective component (a) and the gray value (b) of the middle row before scattering correction

3.3 对比度信噪比

使用对比度信噪比(CNR)^[12]量化评估两种

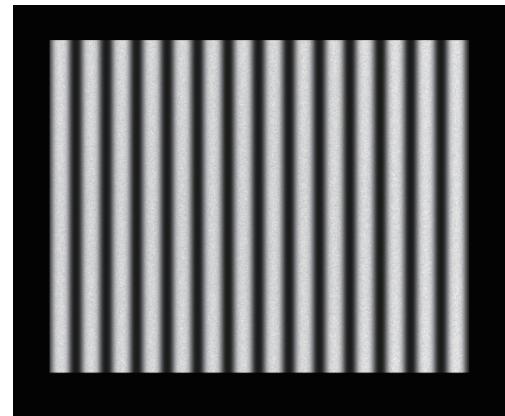


图6 完整核燃料组件投影图
Fig.6 Complete nuclear fuel assembly projection

示于图7和图8。从投影图中能够观测到核燃料组件的某些位置出现了缺陷。由于散射射线的干扰,投影图中燃料棒完整部分与缺陷部分的对比度不高,完整燃料棒中包含许多“散粒”,导致燃料棒中细节缺失。在相同条件下,通过调节Geant4代码ComptonFlag类标记在整个核燃料组件中发生康普顿散射的光子,并在探测器中统计散射射线分布。将未进行散射校正的核燃料组件原始投影数据减去由ComptonFlag标记的散射射线分布数据得到校正后的组件投影图像。对比较散射光子前后,第七、第八根核燃料棒的中间行灰度值,未经过散射校正处理前,缺陷处出现了一个干扰峰,导致无法准确识别缺陷(图7)。经散射校正后,缺陷处出现的干扰峰消失,可以观察到峰与谷的对比明显(图8)。

情况下完整核燃料棒和缺陷的对比度:

$$CNR = (|\mu_i - \mu_0|) / [(\sigma_i)^2 + (\sigma_0)^2]^{1/2} \quad (5)$$

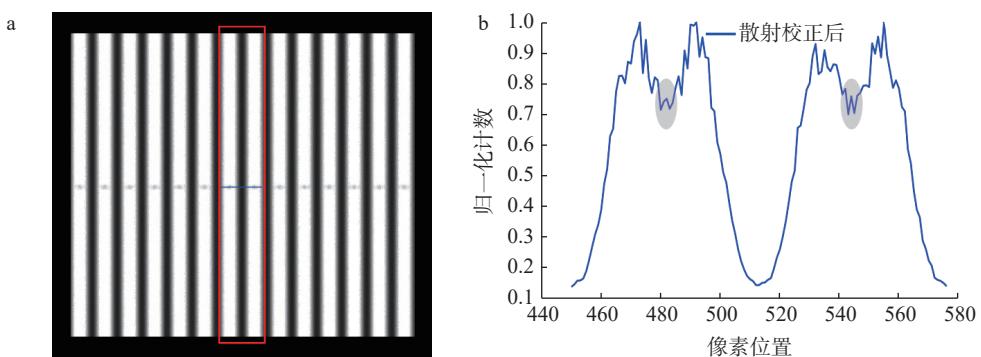


图 8 散射校正后的缺陷组件投影图(a)及中间行灰度值(b)

Fig.8 The projection of the defective component (a) and the gray value (b) of the middle row after scattering correction

式中: μ_i 和 μ_0 分别为选中的缺陷区域和完整核燃料棒区域的平均灰度值; σ_i 、 σ_0 即为选定缺陷区域和完整核燃料棒区域灰度值的标准差。图 9 中 a 为缺陷中心内区域, b 为完整核燃

料棒区域(无缺陷), a、b 区域面积大小相等, 经计算得到散射校正前后两者的 CNR 值分别为 3.40819 和 5.7498, 校正后的对比度信噪比提升了 69.02%。

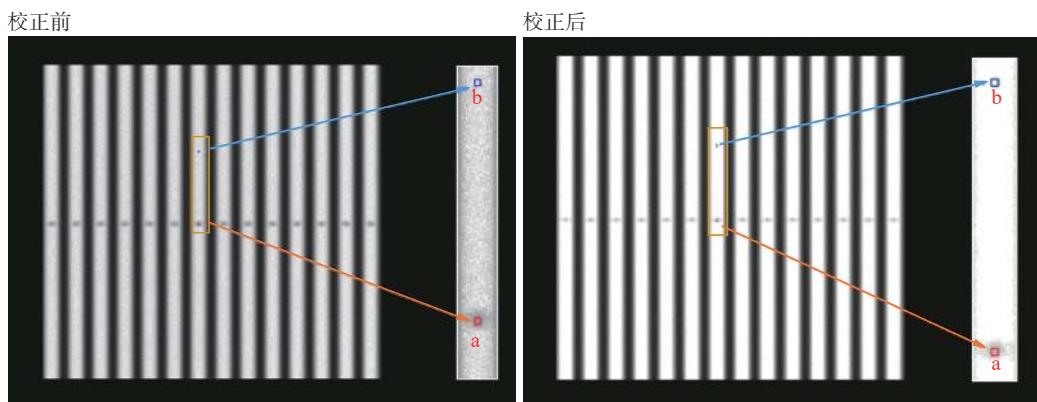


图 9 散射校正前后的组件放大感兴趣区域对比

Fig.9 Comparison of the region of interest in component amplification before and after scattering correction

4 结论

本研究针对核燃料组件的特征, 为精确分析散射射线对面阵列探测器统计的投影数据造成的干扰, 分析比较各种散射校正方法, 采用蒙特卡罗方法模拟散射射线的径迹与物理过程。通过 Geant4 中对高能 X 射线核燃料组件无损检测系统进行仿真建模获得检测图像, 未进行散射校正的投影图像对比度较差, 散射造成图像质量降低, 导致重要的特征细节被模糊。通过蒙特卡罗方法仿真获取散射射线在探测器中的分布, 剔除散射干扰后完整核燃料棒与缺陷的 CNR 比散射校正前提升了 69.02%。表明基于 MC 方法的散射射线校正技术对高能 X 射线核燃料组件无损检测系统的检测质量的提升有重要意义。

参考文献:

- [1] 李建伟, 何高魁, 张向阳, 等. 高能 X 射线 CT 技术在辐照后核燃料组件检测中的发展及应用[J]. 同位素, 2020, 33(2): 124-132.
Li Jianwei, He Gaokui, Zhang Xiangyang, et al. Development and application of high energy X-ray CT technology in the examination of irradiated fuel assembly[J]. Journal of Isotopes, 2020, 33(2): 124-132(in Chinese).
- [2] 崔尧, 张向阳, 何高魁. 核燃料组件无损检测探测系统设计[J]. 同位素, 2015, 28(3): 167-170.
Cui Yao, Zhang Xiangyang, He Gaokui. Detection system for the fuel assembly nondestructive testing[J]. Journal of Isotopes, 2015, 28(3): 167-170(in Chinese).
- [3] 杨富强, 杨璐, 李志翔, 等. X 射线工业 CT 成像过程复杂伪影抑制方法综述[J]. 自动化学报, 2023, 49(4):

- 687-704.
- Yang Fuqiang, Yang Yao, Li Zhixiang, et al. Review of complex artifact reduction methods for industrial computerized tomography imaging[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(4): 687-704(in Chinese).
- [4] Ruhrnschopf E P, Klingenbeck K. A general framework and review of scatter correction methods in cone beam CT. Part 2: scatter estimation approaches[J]. *Medical Physics*, 2011, 38(9): 5186-5199.
- [5] 陈伯显, 张智. 核辐射物理及探测学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- [6] von Deschwanden C, Schielein R, Plamondon M, et al. Hardware based contrast enhancement and cupping reduction in industrial MeV Cone Beam Computed Tomography[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2021, 994: 165044.
- [7] Cai W, Ning R, Conover D. Scatter correction using beam stop array algorithm for cone-beam CT breast imaging[C]//Medical Imaging Proc SPIE 6142, Medical Imaging 2006: Physics of Medical Imaging. San Diego, California, USA: [s. n.], 2006: 1157-1165.
- [8] Lee H, Fahimian B P, Xing L. Binary moving blocker-based scatter correction for single scan cone beam CT system with off-centered detector[J]. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2012, 84(3): S797.
- [9] Cai W, Ning R, Conover D L. Simplified method of scatter correction using a beam-stop-array algorithm for cone-beam computed tomography breast imaging[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(9): 097003.
- [10] Klein O, Nishina Y. Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac[J]. *Zeitschrift Für Physik*, 1929, 52(11): 853-868.
- [11] 刘建邦, 席晓琦, 韩玉, 等. 基于 K-N 模型的锥束 CT 散射伪影校正方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1134001. Liu Jianbang, Xi Xiaoqi, Han Yu, et al. A new scattering artifact correction method based on K-N formula for cone-beam computed tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1134001(in Chinese).
- [12] Patterson M S, Foster F S. The improvement and quantitative assessment of B-mode images produced by an annular array/cone hybrid[J]. *Ultrasonic Imaging*, 1983, 5(3): 195-213.