用于无损检测的康普顿散射断层成像技术研究

刘彦韬1,2,3,4,李昕1,2,尚嘉宣1,2,章志明1,2,3,4

(1.中国科学院高能物理研究所,北京市射线成像技术与装备工程技术研究中心,北京 100049; 2.中国科学院大学,核科学与技术学院,北京 100049; 3.济南中科核技术研究院,济南 250131; 4.国家原子能机 构核技术(核探测与核成像)研发中心,北京 100049)

摘 要:基于康普顿散射效应,我们开发了一种能够实现原位、实时和单侧三维成像的康普顿散射断层成像样机。成像结果表明,该样机能准确地重建样品(小药瓶)的三维轮廓和内部空腔,空间分辨率约为1.5 mm。因此,我们相信康普顿散射断层成像技术在地下物体、墙体材料、大型航空航天部件等高精度无损检测(NDT)中将具有良好的发展潜力。

关键词:康普顿散射断层成像;无损检测;三维成像

A study of Compton scattering tomography for nondestructive testing

Liu Yantao^{1,2,3,4}, Li Xin^{1,2}, Shang Jiaxuan^{1,2}, Zhang Zhiming^{1,2,3,4}

Beijing Engineering Research Center of Radiographic Techniques and Equipment, Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China; 2. Chinese Academy of Science School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jinan Laboratory of Applied Nuclear Science, Jinan 250131, China; 4. CAEA Center of Excellence on Nuclear Technology Applications for Nuclear Detection and Imaging, Beijing 100049, China)

Abstract : Based on the Compton scattering effect, we have developed a prototype of Compton scattering tomography (CST) which can achieve in situ, real-time and one-sided three-dimensional imaging. The imaging results show that the prototype can accurately reconstruct the three-dimensional profile and the internal cavity of a sample (vial) with the spatial resolution of about 1.5 mm. Therefore, we believe the CST has a good development potential in high-precision non-destructive testing (NDT) of underground objects, wall materials, large aerospace components, and so on.

Keywords: Compton scattering tomography (CST); Nondestructive testing (NDT); three-dimensional imaging

1 研究背景

康普顿散射成像是一种基于康普顿散射效应,通过探测 X/γ射线在物体中的散射强度差异来反映物体内 部电子密度分布的无损检测技术。与常规透射成像技术相比,散射成像技术具有对低原子序数材料敏感, 可支持原位、实时和单侧三维成像等优点,对于地下物体、墙体材料、大型航空航天部件等无损检测具有 独特优势^[1]。目前国内关于康普顿散射成像技术研究基本停留在二维成像层面,较少开展可实现三维成像的 康普顿断层成像(Compton Scattering Tomography, CST)技术研究。

2 研究内容



图 1 康普顿散射断层成像样机

Fig. 1. The prototype of Compton scattering tomography.

本工作基于团队前期开展的推扫型康普顿散射成像研究积累^[2-5],进一步开发了一种能够实现原位、实时和单侧三维成像的康普顿散射断层成像样机,如图1所示,由X光机、面阵探测器、单针孔准直器和移动平台构成,其中面阵探测器采用21×21像素的高性能GAGG闪烁体阵列,单像素尺寸为2.1mm×2.1mm; 单针孔准直器的开孔尺寸为0.8mm,张角为90°,固定在探测器前端,与探测器距离内部可调。X光机和整 套探测系统均位于被测样晶同侧,出射X射线经前准直器准直为约2mm宽的扇束,以45°角斜入射被测样 品,与样品发生康普顿散射后再经单针孔准直器被面阵探测器收集。每次成像可获得一帧样品二维截面图 像,通过载物平台步进或连续平移即可获得多帧二维截面图像,将多帧图像堆叠即可实时获得物体三维结构。





图 2 展现了一次完整的康普顿散射断层成像过程。将图 2a 所示的小药瓶样品置于载物台边缘,样品中 心和探测器中心分别距针孔准直器中心 35mm 和 60mm。按每层 10s 的速度对连续 18 个 2mm 断层进行推扫 成像,各个断层成像结果如图 2d 所示,单层图像空间分辨率约为 1.5mm,然后将所有二维截面堆叠形成如 图 2b 所示的三维结构图,其三视图如图 2c 所示,可以清晰看到小药瓶样品的三维轮廓和内部空腔等细节。

通过调整面阵探测器与针孔准直器间距离可以调节成像系统放大比,实现大视野低分辨成像和小视野 高分辨成像两种功能。此外还可以通过在竖直方向上放置多个探测器扩大一次成像视野等。

3 结论

本工作初步完成康普顿散射断层成像样机研制和原理可行性验证,实现了原位、实时和单侧三维成像, 空间分辨率约为1.5mm,能够有效检测样品中的微小空腔,后续将继续开展优化设计,对成像结果进行相 关几何校正和衰减校正,相关技术也有望扩展到更多应用研究中,我们相信该技术在地下物体、墙体材料、 大型航空航天部件等高精度无损检测应用中将具有良好的发展潜力。

参考文献

- KOLKOORI S, WROBEL N, ZSCHERPEL U, et al. A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials[J]. NDT & E International, 2015, 70: 41-52.
- [2] LIU Y, ZHANG Z, LI D, et al. Depth discrimination method based on a multirow linear array detector for

push-broom Compton scatter imaging[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, 82: 293-299.

- [2] XIAO X, LIU Y T, CAO D, et al. A compact, high signal-to-noise ratio line-detector array Compton scatter imaging system based on silicon photomultipliers[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2019, 154: 108845.
- [3] LIU Y, XIAO X, ZHANG Z, et al. A novel method of coded-aperture push-broom Compton scatter imaging: Principles, simulations and experiments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 940: 30-39.
- [4] LIU Y, XIAO X, ZHANG Z, et al. Near-field artifacts reduction in coded aperture push-broom Compton scatter imaging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 957: 163385.