



核科学与工程

针孔相机全场 X 射线荧光成像的模拟研究*

何 泽, 黄 宁, 王 鹏, 陈子晗, 彭 博

(四川大学 原子核科学技术研究所, 辐射物理与技术教育部重点实验室, 成都 610064)

摘 要: 为解决全场 X 射线荧光 (XRF) 成像中针孔形状和尺寸的选取问题, 采用 Geant4 软件, 模拟了 6 种不同类型针孔和 4 种不同的针孔孔径, 分析了这些参数对点扩散函数和调制传递函数的影响; 模拟了不同能量 X 射线荧光平面源的成像过程, 并用均值滤波和 Richardson 迭代法对图像进行处理, 分析了图像处理的效果。模拟结果表明: 对于能量小于 20 keV 的荧光 X 射线, 双锥孔结合直孔模型的点扩散函数尖锐性和等晕性更好, 调制传递函数的截止频率更大, 空间分辨率更好, 更适合做全场 XRF 成像的针孔; 均值滤波结合 Richardson 迭代法的图像处理算法对全场 XRF 图像处理的效果较好。

关键词: 全场 XRF; Geant4 模拟; 空间分辨; 图像处理

中图分类号: O657.34

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210299

Simulation study of full-field X-ray fluorescence imaging with a pinhole camera

He Ze, Huang Ning, Wang Peng, Cheng Zihan, Peng Bo

(Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of the Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: To solve the problem of selecting shape and size of the pinhole in the full-field X-ray fluorescence (XRF) imaging, the Geant4 Monte Carlo simulation software was used to simulate pinholes of 6 different types and 4 different diameters. The effects of the parameters on the spatial resolution which referred to the point spread function and the modulation transfer function were analyzed. The imaging process of different energy fluorescence X-ray plane sources is simulated, and the performance of image processing was analyzed by mean filter and the Richardson iteration method. The simulation results show that the pinhole model of the double conical-hole combined with the straight-hole has better sharpness and isoplanatism of the point spread function, a higher cut-off frequency of modulation transmission function, and better spatial resolution for X-ray of the energy less than 20 keV, which meant it is more suitable for full-field XRF imaging; the algorithm of mean filtering combined with the Richardson iteration performs better in full-field XRF image processing.

Key words: full-field XRF; Geant4 simulation; spatial resolution; image processing

在地质矿石分析和考古样品分析的领域中, X 射线荧光光谱分析 (XRF) 有着广泛的应用, 它能给出元素的组分, 具有快速无损的特点。随着不同分析需求的提出, 如元素二维分布问题, 使得 XRF 分析技术得到了进一步的提升。实现大面积 XRF 分析的方法之一是使用较大的焦斑照射样品区域, 样品不同位置的 X 射线荧光通过光学设备后, 在面阵探测器的不同位置沉积能量并被记录, 最后提取这些位置的 XRF 信息从而实现该样品区域的元素分析。这种方式需要的设备有 X 射线光源、光学设备 (针孔 Pinhole^[1]、多孔毛细管 Polycapillary^[2]、编码孔 Coded aperture^[3] 等) 和面阵探测器 (CCD) 等, 这种方法称作全场 XRF, 具有节省时间、空间分辨率高和不需要扫描的特点。

不同于扫描 XRF 成像使用的点探测器, 全场 XRF 使用的面阵探测器, 能同时收集二维样品上发射的荧光光子, 并且广泛使用的面阵探测器如 CCD 或 CMOS 相机为硅基灵敏材料, 对 3~20 keV 的低能 X 射线具有一定的量

* 收稿日期: 2021-07-19; 修订日期: 2021-10-28
基金项目: 四川省重大科技专项 (2020ZDZX0004)
联系方式: 何 泽, heze@stu.scu.edu.cn。
通信作者: 黄 宁, huang_ning@scu.edu.cn。

子效率。这类相机像素尺寸可低于十几 μm , 适合用在对空间位置有较高需求的成像应用中。

在光学设备中针孔的原理最简单, 且最容易加工制作。早在 1991 年日本的 Tsunemi H 等人^[4] 就开始利用相机开展了 XRF 的初步研究, 给出了样品的两种元素的分布图。2007 年俄罗斯的 Vasin M G 等人^[1] 利用针孔相机开展元素成像的研究, 研究了相机的刻度、能谱修正和元素信息提取的算法, 给出了金属合金的彩色元素分布图。2010 年德国的 Antwep M 等人^[5] 在同步辐射光源束流线上, 利用针孔相机开展考古文物的研究, 给出了元素分布图。意大利的 Romano F P 等人在 2013 年、2014 年、2016 年, 日本的 Zhao Wenyang 等人在 2017 年^[6-9] 都做过同样的工作。针孔相机用于全场 XRF 成像被越来越多的人所研究, 其能量分辨可达 $133 \text{ eV} @ 5.9 \text{ keV}$, 空间分辨可达 $30 \mu\text{m}$ ^[7]。

针孔成像需要解决两个主要问题: 一方面, 在不同应用中, 针孔的形状和尺寸也各不相同, 如用在准直射线的准直针孔, 用于中子成像的厚针孔^[10] 以及用于 ICF 诊断的半影针孔^[11] 等。全场 XRF 应用中对针孔空间分辨能力有较高的要求, 需要进一步研究针孔形状尺寸和空间分辨的关系; 另一方面, 针孔成像是颠倒的并且存在模糊效应, 需要对图像进行处理, 重建更清晰的图像。基于上述问题, 本文主要对针孔相机进行模拟研究, 模拟 FF-XRF 成像的过程, 研究针孔的孔型和孔径对成像装置空间分辨率的影响, 为进一步制作针孔和实验提供优化参数。同时为了提高图像的质量, 研究了针孔相机 XRF 图像的处理方法。

1 方 法

基于针孔相机的全场 XRF 装置的原理示意图, 如图 1 所示。X 射线管发射的 X 射线, 打到样品表面激发出样品的特征 X 射线, 标识样品不同位置的元素组成, 呈 4π 立体角发射, 同时样品也会散射初级 X 射线。针孔安装在样品和探测器中间, 且针孔尺寸很小, 所张的立体角也非常小, 来自样品的绝大部分荧光和散射光子被针孔吸收或散射, 只有少数直接穿过针孔或与孔壁发生小角度散射的光子才能到达探测器表面, 这部分 X 射线与探测器灵敏体积中的原子发生相互作用, 沉积能量并记录下来。由于针孔中心和面阵探测器中心处于同一水平面上, 且针孔的孔径远小于样品的尺寸, 所以在面阵探测器上成的像是倒立翻转的像。

上述成像过程可以通过建立数学模型来表示

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) + n(x,y) \quad (1)$$

式中: X 射线管激发样品产生的 X 射线荧光表示为 $f(x,y)$, 假设针孔为一个退化的系统, 表示为 $h(x,y)$, 通过卷积“*”操作可以得到一个退化的 X 射线荧光所成的像, 加上噪声 $n(x,y)$ 就可以得到面阵探测器上所成的像 $g(x,y)$, 且 (x,y) 表示平面二维坐标。

针孔主要用于屏蔽 X 射线, 仅开孔的地方通过 X 射线, 其孔径的材料与厚度不同, 成像的效果也不同。针孔材料的选取需要考虑的因素包括: 一是 X 射线的屏蔽性, 二是不容易激发针孔材料的特征 X 射线或产生较强的散射, 三是选取的材料要便于加工。针孔作屏蔽用时必须吸收尽可能多的 X 射线光子, 即选择对 X 射线吸收截面大的材料。X 射线在物质中的衰减服从指数衰减规律, 如式 (2) 所示

$$N = N_0 e^{-\mu d} \quad (2)$$

式中: N, N_0 分别为 X 射线衰减后和衰减前的强度, μ 为线衰减系数, d 为屏蔽物质的厚度。当穿过屏蔽物质后 X 射线的强度降低为未衰减时强度的 $1/e$, 这时的屏蔽物质的厚度称为平均自由程 (MFP), 以 λ 表示的平均自由程为

$$\lambda = 1/\mu \quad (3)$$

屏蔽材料的厚度包含的平均自由程越多, X 射线的衰减就越多^[12]。

常见的屏蔽材料有铝、铁、铜、铅、钨, 其平均自由程如图 2 所示。由图可知, W 和 Pb 的平均自由程最小, 而 Pb 较柔软易变形, 故 W 更适合做针孔材料。针对不同能量的特征 X 射线, 针孔的厚度最少可以为平均自由程的 3 倍, 如 $9 \mu\text{m} @ 8.047 \text{ keV}$ (Cu-K α)、 $12 \mu\text{m} @ 15.77 \text{ keV}$ (Zr-K α) 和 $30 \mu\text{m} @ 22.1 \text{ keV}$ (Ag-K α)。故认为针孔厚度大于 $30 \mu\text{m}$ 时, 就可以有效阻挡能量小于 20 keV 的 X 射线, 且有效屏蔽来自针孔材料的散射 X 射线和 X 射线荧光。

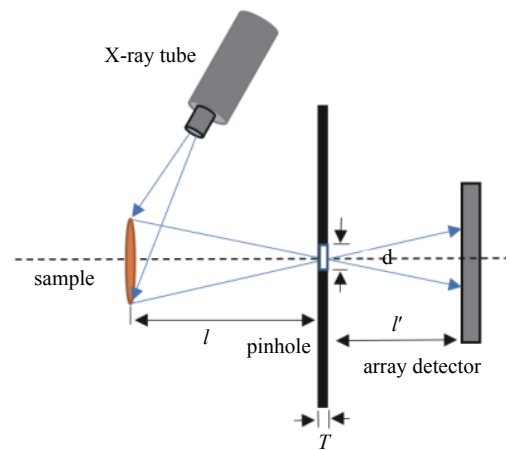


Fig. 1 The principle of FF-XRF imaging based on pinhole

图 1 基于针孔的 FF-XRF 成像原理

2 不同针孔孔型的成像过程模拟

2.1 Geant4 模拟与评价指标

Geant4 是欧洲核子中心 CERN 开发的用于模拟基本粒子输运并与物质发生相互作用的通用蒙特卡罗软件程序包^[14]。Geant4 用 C++ 语言编写,可在 Linux 和 Windows 环境下运行,具有极强的操作性。Geant4 可以模拟的粒子有六大类:轻子,介子,重子,玻色子,短寿命粒子和离子。Geant4 可以模拟的物理作用过程有:电磁相互作用,强子相互作用,输运,衰变,光学,光子与轻子强子和参数化相互作用。Geant4 可以通过预先定义好的基本几何体模型构建出绝大多数几何模型,同时还包含有探测器响应、事例及径迹管理、用户界面等一套完整的模拟仿真工具。

基于针孔相机的全场 XRF 成像装置受针孔的孔型和大小影响,使得 XRF 图像的质量产生了退化,使得成像装置空间分辨受到了限制。点扩散函数 (PSF) 反映了系统对点光源的弥散程度,可以用于描述图像退化这一过程,认为物体与点扩散函数卷积后得到退化的图像,不同的针孔装置具有不同的 PSF。评价 PSF 的指标有尖锐性和等晕性,尖锐性指边缘尽量陡峭,等晕性指中间展宽尽量不变,即如图 3 所示。PSF 的尖锐性指左尖锐性和右尖锐性,左尖锐性的值为 PSF 曲线左半侧最大值与最小值的横坐标之差 $X_3 - X_1$,右尖锐性的值为 PSF 曲线右半侧最小值与最大值的横坐标之差 $X_6 - X_4$,其值越小越好;PSF 的等晕性指 PSF 曲线左右两侧半高处的横坐标之差 $X_5 - X_2$,类似于半高宽,其值小说明空间分辨率高。

将点扩散函数做傅里叶变换就可以得到光学传递函数 (OTF),其傅里叶变化过程可表示为

$$\text{OTF}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{PSF}(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \quad (4)$$

式中: $\text{OTF}(u, v)$ 指二维的光学传递函数, $\text{PSF}(x, y)$ 指二维的点扩散函数,二维傅里叶变换指将 $\text{PSF}(x, y)$ 分解成若干个复平面波 $e^{-2\pi i(ux+vy)}$ 之和, (x, y) 指空间域内坐标, (u, v) 指频域内坐标, $dx dy$ 指二重积分的微元。

光学传递函数的模称为调制传递函数 (MTF),数学表达如式 (5) 所示,这种获得调制传递函数的方法称为“点光源法”。调制传递函数是一个重要的描述光学系统的性能参数,常用来评价成像装置的成像质量,如空间分辨率。

$$\text{MTF} = |\text{OTF}(u, v)| \quad (5)$$

调制传递函数是以空间频率为变量的函数,表示为不同空间频率的调制度 (对比度) 之比,反映了一个成像系统传递不同空间频率的物体信息的能力,也就是反映物体细节的能力。一般取 MTF 值为 0.5 时对应横坐标值为系统的空间截止频率 f_c ,常通过空间截止频率 f_c 来评价成像装置的空间分辨能力。

2.2 模拟结果

针孔的孔型直接决定点扩散函数的形状,本文选取了 6 种常见的针孔形状,分别模拟了点源在针孔孔径 d 为 50, 100, 200, 400 μm 时的点扩散函数。将源到探测器的距离设置为 100 mm,针孔的材料设为钨,厚度为 100 μm ,内径 r 为外径 d 的一半,源到针孔的距离为 50 mm,针孔到面阵探测器的距离为 50 mm。这六种孔型分别为直孔模型、双锥孔模型、双锥孔结合直孔模型、右锥孔模型、左锥孔模型和半影孔模型如图 4 所示,其中 X 射线穿过针孔时存在 3 种情况:(1)被针孔屏蔽阻挡,(2)穿过针孔到达面阵探测器,(3)经针孔内壁反射发散在面阵探测器上形成光晕。直孔模型的锥角为 0° ,双锥孔模型和半影孔模型的锥角相同,孔径 d 为 50, 100, 200, 400 μm 时锥角分别为: 14.0° , 26.6° , 45.0° , 63.4° ,左、右锥孔模型的锥角相同,孔径 d 为 50, 100, 200, 400 μm 时锥角分别为: 7.1° , 14.0° , 26.6° , 45.0° ,双锥孔几何直孔模型的锥角在孔径 d 为 50, 100, 200, 400 μm 时锥角分别为: 20.6° , 36.9° , 56.3° , 71.6° 。

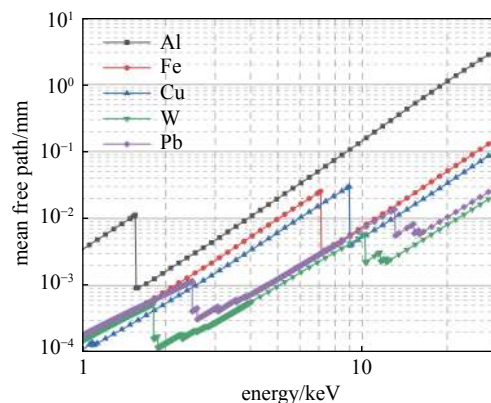


Fig. 2 The mean free path of different materials in the range of 1-30 keV

图 2 不同材料在 1~30 keV 范围内的平均自由程^[13]

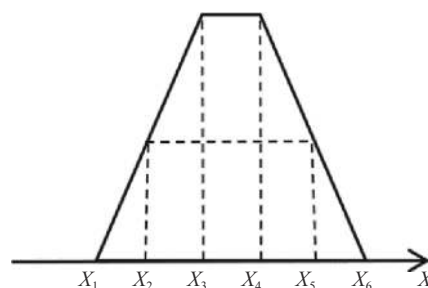


Fig. 3 Sharpness and isoplanatism of PSF

图 3 PSF 的尖锐性和等晕性

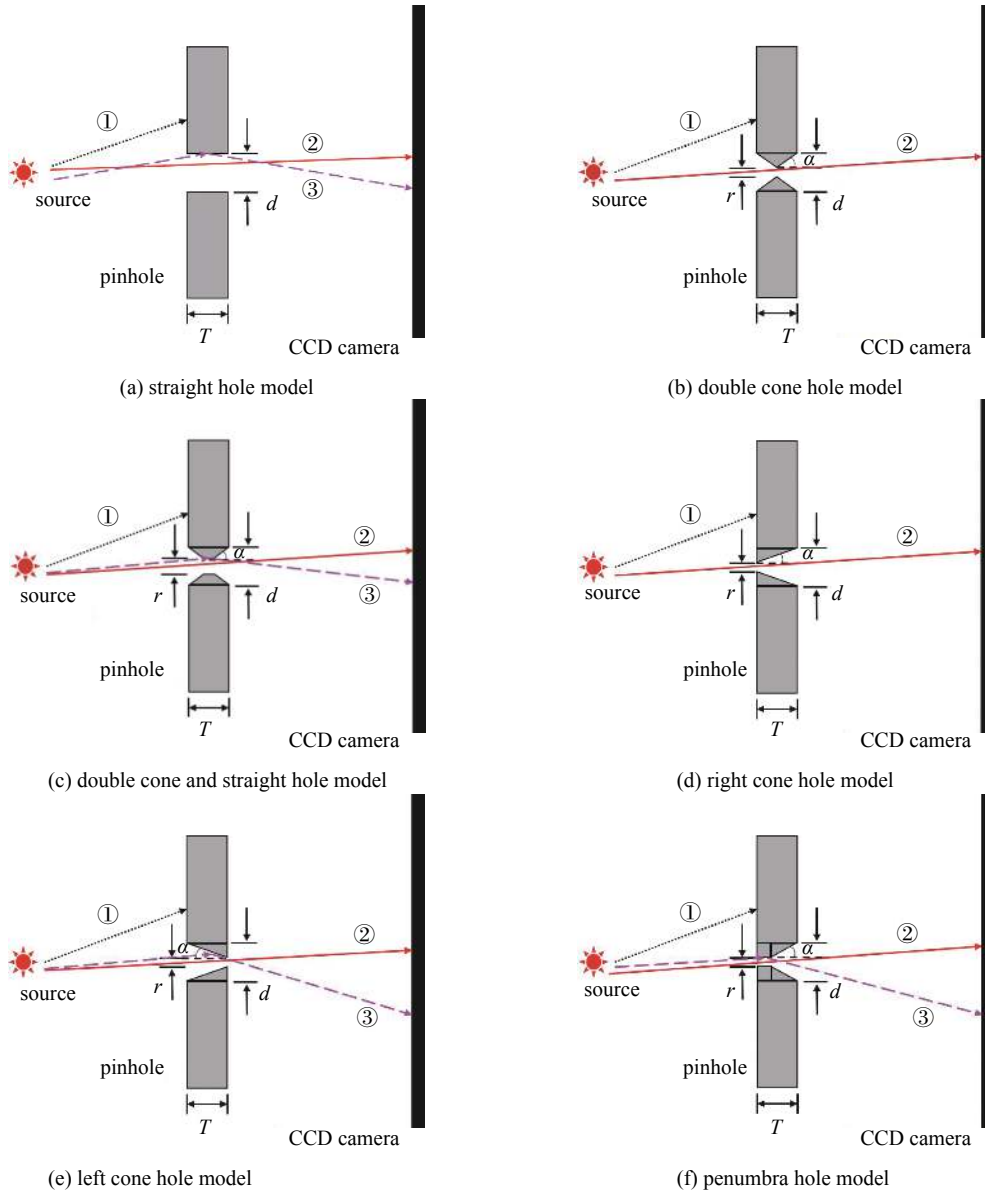
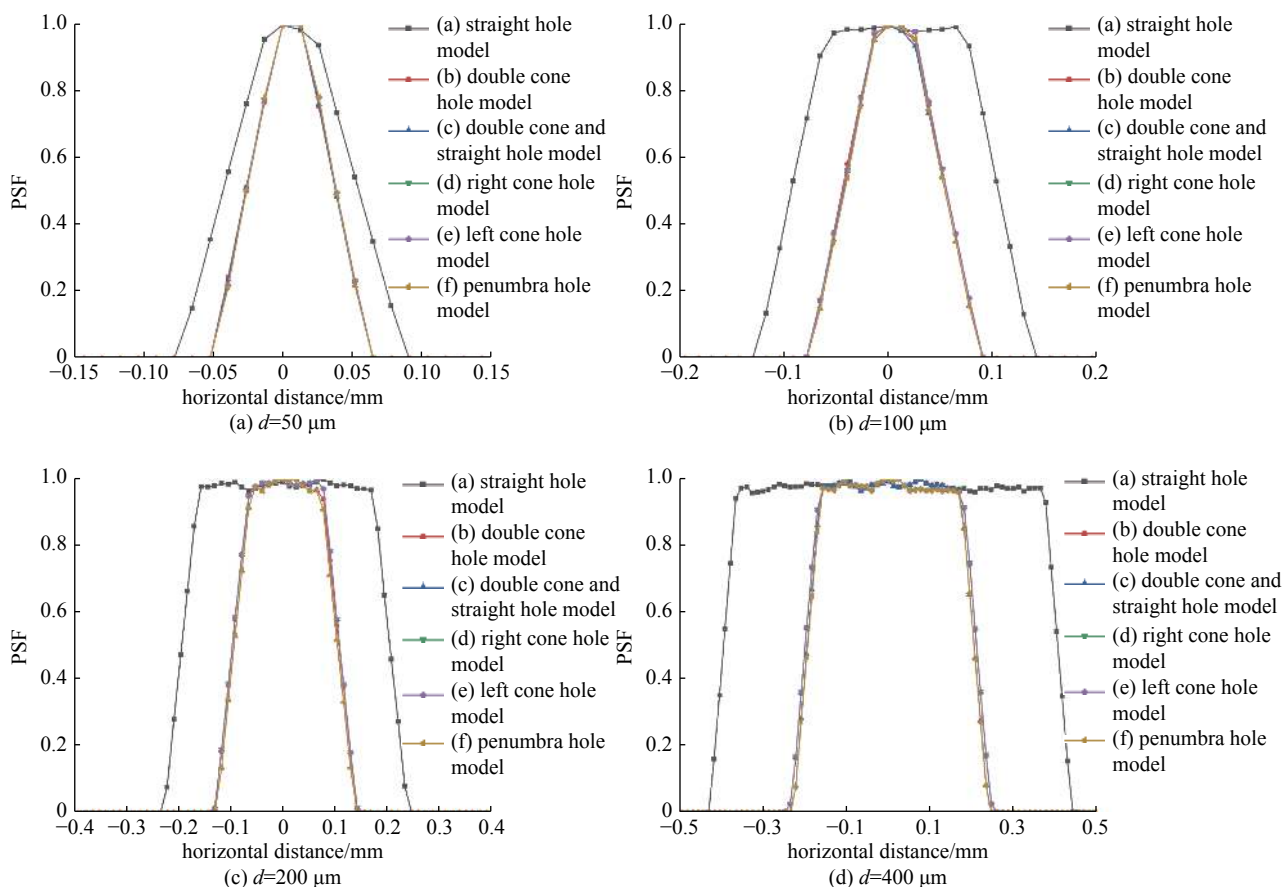


Fig. 4 Six different pinhole mask structures

图 4 六种不同的针孔结构

在进行成像模拟的过程中,采用的是小角度发射 X 射线的点源,可提高模拟的效率。同时采用 8.0 keV 的 Cu-K_α 特征 X 射线来模拟单能的荧光源,用 $200\ \mu\text{m}$ 厚的 Be 窗和 $40\ \mu\text{m}$ 厚的 Si 探测器代替相机,模拟的像素大小为 $13\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$,选用了 100×100 个像素,总探测面积为 $1.3 \times 1.3\ \text{mm}^2$,理论能量分辨可达 $133\ \text{eV} @ 5.9\ \text{keV}$ 。模拟得到孔径为 50, 100, 200 和 $400\ \mu\text{m}$ 时孔型 (a)~(f) 的点扩散函数如图 5 所示,对应的点扩散函数尖锐性和等晕性如表 1 所示。不同孔型的针孔对 X 射线散射的效率不同,散射的 X 射线会增加透过针孔的光子数,使曲线下沿展宽,也就是形成光晕。在图 5 (a) 中孔径 $d=50\ \mu\text{m}$,双锥孔结合直孔模型、半影孔模型、左右锥孔模型和双锥孔模型更集中,直孔模型扩展最宽。双锥孔结合直孔模型和半影孔模型的左右尖锐性最好,其值最小为 $52\ \mu\text{m}$,等晕值为 $64\ \mu\text{m}$ 和 $66\ \mu\text{m}$ 。随着孔径的增大,PSF 的展宽逐渐增加,在图 5 (b) 中孔径 $d=100\ \mu\text{m}$,双锥孔结合直孔模型和半影孔模型的左右尖锐性值最小为 $65\ \mu\text{m}$,等晕值为 $97\ \mu\text{m}$ 。在图 5 (c) 中孔径 $d=200\ \mu\text{m}$,PSF 展宽变大且中心包含的数据点增多,双锥孔结合直孔模型和半影孔模型的左右尖锐性值最小为 $65\ \mu\text{m}$,等晕值为 $198\ \mu\text{m}$ 。在图 5 (d) 中孔径 $d=400\ \mu\text{m}$,PSF 的展宽最大,直孔模型、双锥孔结合直孔模型和半影孔模型的左右尖锐性较优,其值最小为 $78\ \mu\text{m}$,双锥孔结合直孔模型等晕值最小为 $398\ \mu\text{m}$ 左右。从针孔类型来看,不同孔型影响着 PSF 的左右尖锐性,双锥孔结合直孔模型和半影孔模型的 PSF 尖锐性最优。从针孔孔径大小上来看,等晕值接近针孔孔径,孔径为 $50\ \mu\text{m}$ 时的双锥孔结合直孔模型的 PSF 等晕值最小为 $64\ \mu\text{m}$,其空间分辨最优。

Fig. 5 PSF with different aperture types at the pinhole diameter of 50 μm , 100 μm , 200 μm and 400 μm 图 5 孔径为 50 μm , 100 μm , 200 μm 和 400 μm 时不同孔型的 PSF表 1 孔径为 50 μm , 100 μm , 200 μm 和 400 μm 时不同孔型下 PSF 的尖锐性和等晕性Table 1 Sharpness and isoplanatism of PSF with different pinhole mask structures at the pinhole diameter of 50 μm , 100 μm , 200 μm and 400 μm

diameter/ μm	pinhole mask structures	left sharpness/ μm	right sharpness/ μm	isoplanatism/ μm
50	(a) straight hole model	65	65	98
	(b) double cone hole model	65	65	64
	(c) double cone and straight hole model	52	52	64
	(d) right cone hole model	65	65	66
	(e) left cone hole model	65	65	66
	(f) penumbra hole model	52	52	66
100	(a) straight hole model	65	65	200
	(b) double cone hole model	78	78	100
	(c) double cone and straight hole model	65	65	97
	(d) right cone hole model	78	78	99
	(e) left cone hole model	78	78	99
	(f) penumbra hole model	65	65	97
200	(a) straight hole model	78	78	399
	(b) double cone hole model	78	78	205
	(c) double cone and straight hole model	65	65	198
	(d) right cone hole model	78	78	206
	(e) left cone hole model	78	78	205
	(f) penumbra hole model	65	65	198
400	(a) straight hole model	78	78	800
	(b) double cone hole model	104	104	411
	(c) double cone and straight hole model	78	78	399
	(d) right cone hole model	104	104	411
	(e) left cone hole model	104	104	411
	(f) penumbra hole model	78	78	398

将孔径为 50 μm , 100 μm , 200 μm 和 400 μm 时孔型 (a)~(f) 的点扩散函数进行傅里叶变换得到调制传递函数, 如图 6 所示。在频域内对高频信号响应越大, 对应着空域内空间分辨能力越好。发现图 6 (a)~(d) 中直孔模型的 MTF 明显较窄, 对高频信号的响应没有其它五种模型好, 故其空间分辨能力最差。在孔径 $d=50 \mu\text{m}$ 时 MTF 对高频信号最好, 空间分辨最好, 随着孔径的增大, MTF 明显变窄, 在孔径 $d=400 \mu\text{m}$ 时 MTF 对高频信号的响应变差, 空间分辨率最差。通过对上述 MTF 曲线进行插值得到截止频率如表 2 所示, 双锥孔结合直孔模型和半影孔模型空间分辨能力优于其它 4 种, 在 $d=50 \mu\text{m}$ 时半影孔的截止频率为 10.2 lp/mm, 双锥孔结合直孔模型的截止频率为 10.1 lp/mm, 在 $d=100 \mu\text{m}$ 时两者均为 6.9 lp/mm, 在 $d=200 \mu\text{m}$ 时两者均为 3.7 lp/mm, 在 $d=400 \mu\text{m}$ 时两者均为 2.0 lp/mm。综合上述结果, 发现双锥孔结合直孔模型的 PSF 的尖锐性和等晕性更好, 截止频率更大, 空间分辨好, 更适合用做全场 XRF 成像装置的光学设备。

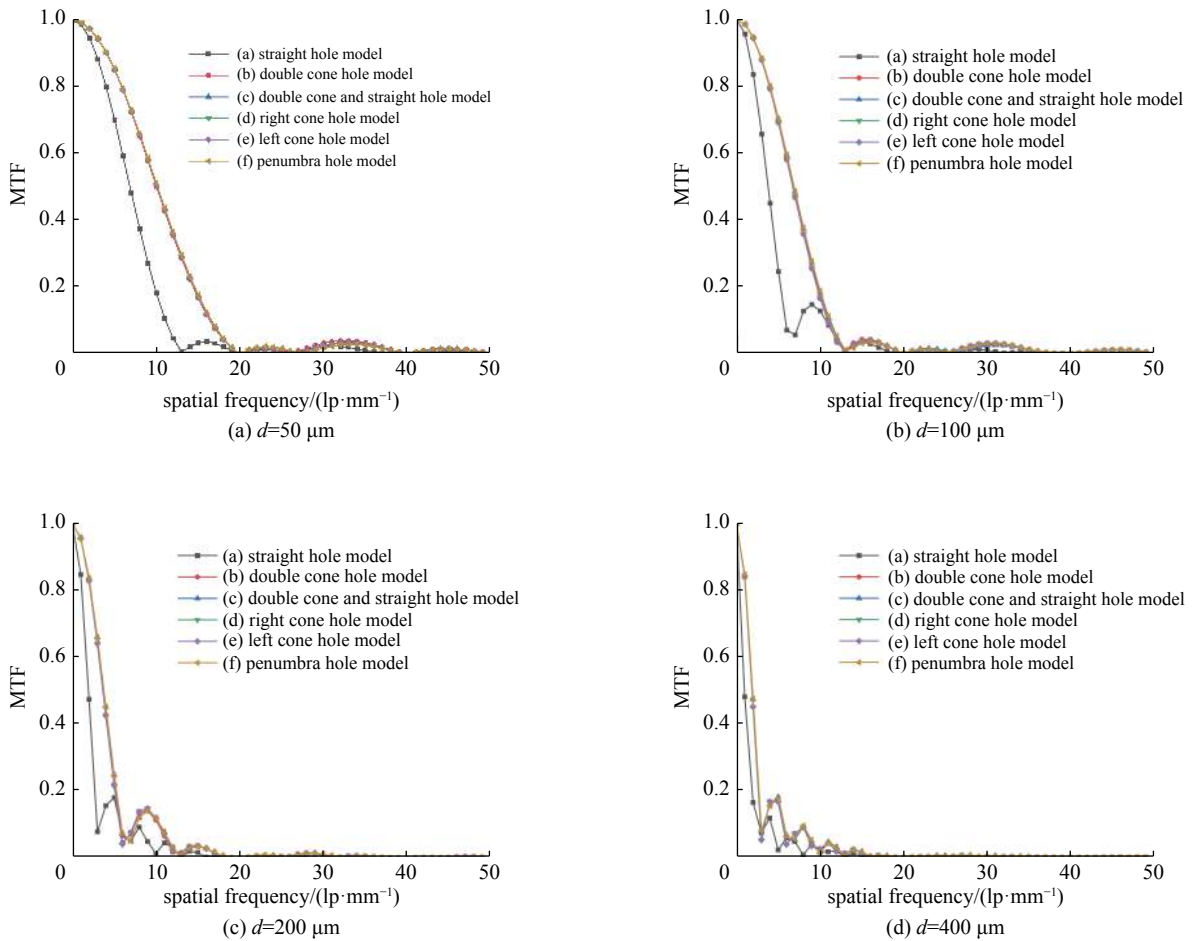


Fig. 6 MTF with different aperture types at the pinhole diameter of 50 μm , 100 μm , 200 μm and 400 μm

图 6 孔径为 50 μm , 100 μm , 200 μm 和 400 μm 时不同孔型的 MTF

表 2 孔径为 50 μm , 100 μm , 200 μm 和 400 μm 时不同孔型下 MTF 的截止频率
Table 2 Cut-off frequency (lp/mm) of MTF with different pinhole mask structures at the pinhole diameter of 50 μm , 100 μm , 200 μm and 400 μm

pinhole mask structure	diameter/ μm			
	50	100	200	400
(a) straight hole model	6.9	3.7	2.0	1.0
(b) double cone hole model	10.0	6.7	3.6	1.9
(c) double cone and straight hole model	10.1	6.9	3.7	2.0
(d) right cone hole model	10.1	6.8	3.6	1.9
(e) left cone hole model	10.1	6.8	3.6	1.9
(f) penumbra hole model	10.2	6.9	3.7	2.0

3 图像重建研究

3.1 Geant4 模拟与成像方法

为了得到针孔相机成的像,本节继续采用 Geant4 模拟的方式,在上一节得到的设备参数基础上,模拟面源的成像过程,面源的形状根据古陶瓷残片上的条纹简化而来^[15]。本节采用了双锥孔结合直孔方式的针孔模型,针孔的孔径 d 为 $100\ \mu\text{m}$,面源的大小约为 $1.0\ \text{mm}\times 1.0\ \text{mm}$,并且条纹面源的不同部位采用不同能量的源,设置了能量分别为 $6.4, 8.0, 9.8$ 和 $12.6\ \text{keV}$ 来代替不同元素的特征 X 射线,由红色、黄色、绿色和蓝色 4 种不同的颜色表示,不同能量的 PSF 如图 7(a)~(d) 所示,原始条纹图像如图 7(e) 所示。

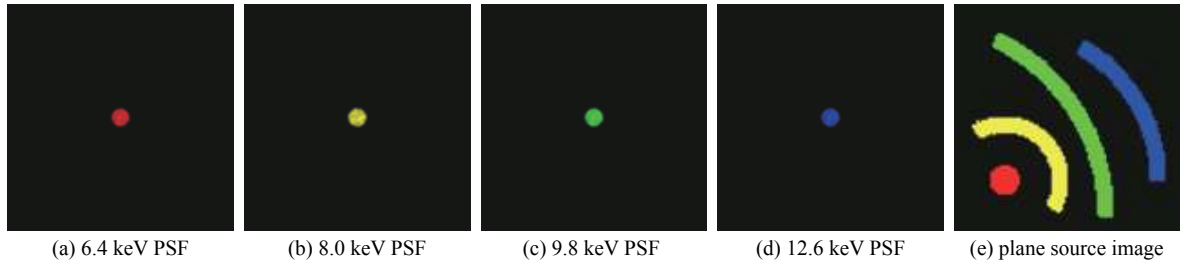


Fig. 7 Images of the original plane source and the PSF of different energy

图 7 条纹状荧光面源和不同能量的 PSF

选用 $0.1\ \text{keV}/\text{channel}$ 对能谱进行统计,由于蒙特卡罗模拟软件不能模拟面阵探测器中的电子学电路,电子学电路中的对信号放大、噪声干扰和信号的处理等对能谱的影响均不能模拟,所以模拟得到的能谱仅与探测器的材料、空间位置和立体角等因素有关,是一个理想的能谱,如图 8 所示,图中包含有 4 种能量的全能峰、探测器中 Si 元素的逃逸峰和 Si 特征峰。其中 $9.8\ \text{keV}$ 的 Si 逃逸峰和 $8.0\ \text{keV}$ 的全能峰叠加在一起。这 4 种能量的峰面积对应着图像不同区域的强度,分别由 4 种颜色来表示 4 种不同的峰面积,并且在相机上像素坐标对应着图像的空间位置信息,最后通过图像处理恢复的最接近真实的面源图像。由于相机对不同能量 X 射线的量子效率不同,其中对 $6.4\ \text{keV}, 8.0\ \text{keV}$ 和 $9.8\ \text{keV}$ X 射线光子的探测效率较高,故峰面积较高。针孔相机所成的 XRF 图像如图 9 所示,面源的 4 个部分如图 9 的 (a)~(d) 所示,由 4 个部分组成的条纹如图 9 (e) 所示。由图像可知,4 种不同颜色表示了

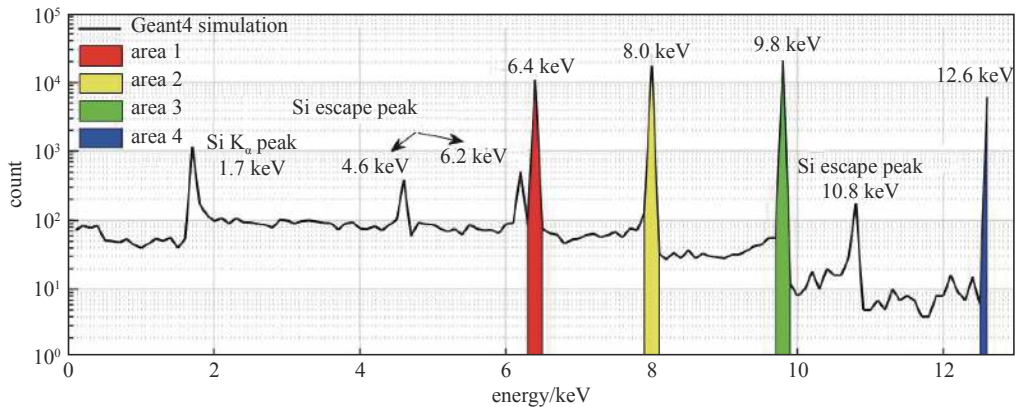


Fig. 8 Energy spectra of four characteristic X-rays

图 8 四种特征 X 射线的能谱图

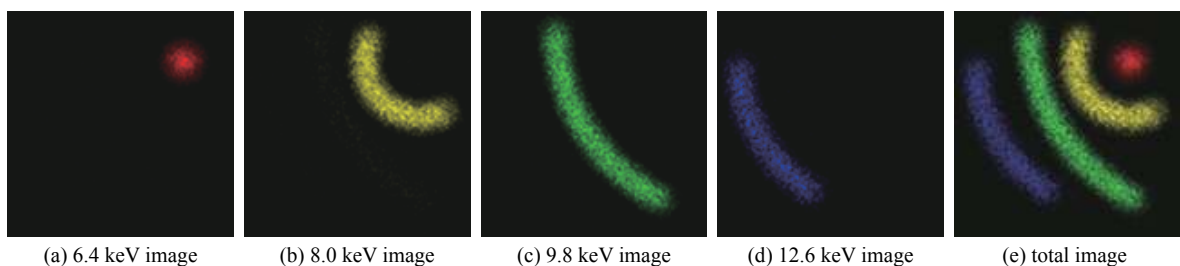


Fig. 9 The pattern composed of different characteristic X-rays

图 9 不同特征 X 射线组成的图案

4个不同的区域,图像的各部分存在一系列不连续的点,且边缘的对比度较差。

3.2 图像重建处理

在全场 XRF 成像的过程中,由于整个系统是退化的系统,所以产生的图像也就是退化的图像。图像的去噪和重建就是图像退化的逆运算,通过图像退化的模型对图像进行处理,恢复出最接近真实图像的图像。

同时考虑到模糊效应和噪声给图像带来的影响,采用了 3×3 的均值滤波的方法先对图像进行去噪处理。但这时的图像仍然与真实的图像有差距,故继续对图像进行非线性 Richardson 迭代^[16]完成图像重建处理, Richardson 迭代法数学模型为

$$f^{r+1}(x,y) = f^r(x,y) \frac{\sum_m \sum_n \frac{PSF(x,y;m,n)g(m,n)}{\sum_x \sum_y PSF(x,y;m,n)f^r(x,y)}}{\sum_x \sum_y PSF(x,y;m,n)f^r(x,y)} \quad (6)$$

式中: $PSF(x,y;m,n)$ 为扩展的 PSF,物面上不同位置 (m,n) 的点源对应的 PSF, $g(m,n)$ 为退化的图像, $f^{r+1}(x,y)$ 为 $r+1$ 次重建的图像,它的初值为 1。由于图像条纹的每一部分能量不同需要分别进行图像重建处理,通过扩展 PSF 和多次 Richardson 迭代,恢复出最接近真实情况的图像。

经针孔相机后得到的是退化的倒转的条纹图像,并且还存在一定的不连续点。处理后图像如图 10 所示,条纹图像更加光滑且强度较为均匀,处理后的图像是正向的图像。图像处理的效果如表 3 所示,4 种能量对应峰面积的统计误差均小于 2%,图像的 4 部分处理效果相差不大,信噪比 (SNR) 的值为 27.0 dB 左右。从迭代次数上来看,经过 2~4 次迭代信噪比就达到最大,这 4 个部分图像处理耗时相差不大,迭代次数都很少。综上所述,均值滤波和 Richardson 迭代法对全场 XRF 图像处理的效果较好,该方法得到了初步验证。

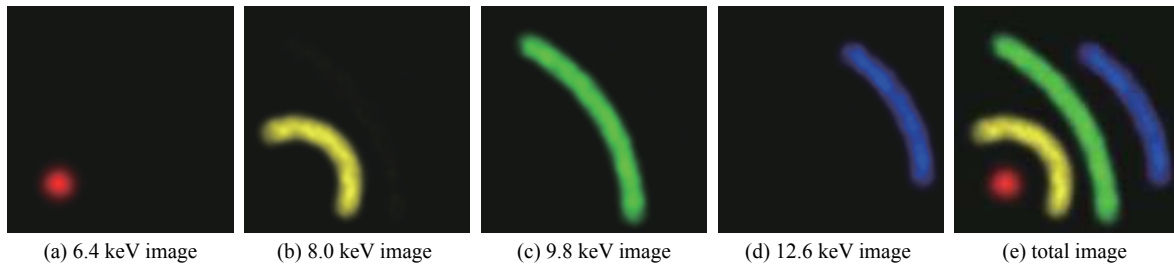


Fig. 10 Pattern composed of different characteristic X-rays after image processing

图 10 图像处理不同特征 X 射线组成的图案

表 3 图像处理的效果

Table 3 The performance of image processing

energy/keV	statistical error/%	original SNR/dB	processed SNR/dB	iterations
6.4	1.2	18.7	26.2	2
8.0	0.8	18.2	26.9	4
9.8	0.7	20.2	27.2	4
12.6	1.2	18.8	26.8	4

4 结 论

本文利用 Geant4 代码模拟了全场 XRF 成像的过程,考虑了针孔孔型和孔径对空间分辨的影响。模拟结果表明:双锥孔结合直孔模型的 PSF 尖锐性更好,且 MTF 高频部分更高,空间分辨能力更强;同时针孔孔径更小时,PSF 的尖锐性和等晕性较好,等晕值最小为 $64 \mu\text{m}$,空间分辨为 10.1 lp/mm 。本文同时还模拟了条纹状面源图像的针孔相机成像的过程,并研究了全场 XRF 图像处理方法,发现使用均值滤波和 Richardson 迭代法能较好的复原出清晰的图像,初步验证了该方法的可靠性。

针孔相机的孔径很小会屏蔽掉大多数的 X 射线,使得 X 射线光子的探测效率很低,下一步可继续研究多孔毛细管或编码孔的结构对全场 XRF 成像系统空间分辨能力的影响。在图像处理方面,精度更高的非线性图像处理方法,如共轭梯度下降法,是可以进一步深入研究的方向。

参考文献:

- [1] Vasin M G Ignatiev Yu V, Lakhtikov A E, et al. Energy-resolved X-ray imaging[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2007, 62(6): 648-653.

- [2] Walter P, Sarrazin P, Gailhanou M, et al. Full-field XRF instrument for cultural heritage: Application to the study of a Caillebotte painting[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2019, 48(4): 274-280.
- [3] Kulow A, Buzanich A G, Reinholz U, et al. Comparison of three reconstruction methods based on deconvolution, iterative algorithm and neural network for X-ray fluorescence imaging with coded aperture optics[J]. *J Anal At Spectrom*, 2020, 35(7): 1423-1434.
- [4] Tsunemi H, Wada M, Hayashida K, et al. X-ray color movie using the charge-coupled device with a direct X-ray detection method[J]. *J Appl Phys*, 1991, 30(12A): 3540-3544.
- [5] Alfeld M, Janssens K, Sasov A, et al. The use of full-field XRF for simultaneous elemental mapping[C]//Proceedings of AIP Conference. 2010, 1221(1): 111-118.
- [6] Romano F P, Altana C, Cosentino L, et al. A new X-ray pinhole camera for energy dispersive X-ray fluorescence imaging with high-energy and high-spatial resolution[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2013, 86(1): 60-65.
- [7] Romano F P, Caliri C, Cosentino L, et al. Macro and micro full field X-ray fluorescence with an X-ray pinhole camera presenting high energy and high spatial resolution[J]. *Anal Chem*, 2014, 86(21): 10892-10899.
- [8] Romano F P, Caliri C, Cosentino L, et al. Micro X-ray fluorescence imaging in a tabletop full field-X-ray fluorescence instrument and in a full field-particle induced X-ray emission end station[J]. *Anal Chem*, 2016, 88(20): 9873-9880.
- [9] Zhao W, Sakurai K. CCD camera as feasible large-area-size X-ray detector for X-ray fluorescence spectroscopy and imaging[J]. *Rev Sci Instrum*, 2017, 88: 063703.
- [10] Chantler C T, Olsen K, Dragoset R A, et al. X-ray form factor, attenuation, and scattering tables[OL]. [2021-11-8].<https://www.nist.gov/pml/x-ray-form-factor-attenuation-and-scattering-tables>.
- [11] 姚志明, 段保军, 马继明, 等. 大孔径厚针孔数值模拟研究[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(2): 379-384. (Yao Zhiming, Duan Baojun, Ma Jiming, et al. Numerical simulation of large thick aperture imaging[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(2): 379-384)
- [12] 余波, 应阳君, 许海波. 中子半影成像的散射中子对点扩散函数的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2714-2718. (Yu Bo, Ying Yangjun, Xu Haibo. Effect of scattered neutrons on point spread function in neutron penumbral imaging[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11): 2714-2718)
- [13] 霍雷, 刘剑利, 马永和. 辐射剂量与防护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 98-100 (Huo Lei, Liu Jianli, Ma Yonghe. Radiation dose and protection[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 98-100)
- [14] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Geant4 developments and applications[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(1): 270-278.
- [15] 段泽明, 刘俊, 姜其立, 等. 便携式微束X射线荧光谱仪的研发[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(18): 2243-2248. (Duan Zeming, Liu Jun, Jiang Qili, et al. Development of portable micro-X-ray fluorescence spectrometer[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(18): 2243-2248)
- [16] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *J Opt Soc Am*, 1972, 62(1): 55-59.