

基于蒙特卡洛的C/C复合材料CT无损检测 散射影响分析与校正方法

侯仲军¹ 金珂² 周星明² 孙跃文³ 徐林²

(1 内蒙古航天红岗机械有限公司, 呼和浩特 010000)

(2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(3 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100091)

文 摘 针对C/C复合材料CT无损检测过程中探测器接收到的散射光子成分造成的图像模糊问题,基于C/C复合材料CT检测过程,本文建立了描述检测过程中射线光子束的输运、吸收、散射等多物理过程的数理模型,结合蒙特卡洛算法原理对模型进行求解,在此基础上针对C/C复合材料的检测需求提出了一种基于光子输运过程的校正算法,对不同规格尺寸C/C复合材料、不同扫描方式进行了对比分析。结果表明,本文建立的模型可准确描述CT检测过程中射线光子束的输运、吸收、散射等多物理过程,提出的校正算法可以有效降低散射光子的噪声干扰,提高图像质量,随着C/C复合材料构件的增大,图像质量受散射光子影响越明显,而被检测产品尺寸越小,散射校正效果越好,检测灵敏度越高。该方法能有效提升图像的密度分辨能力,提升C/C复合材料缺陷的检出能力。

关键词 C/C复合材料,CT检测,蒙特卡洛模拟,散射校正

中图分类号:TB98

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.02.012

Monte Carlo Based Scatter Affection Analysis and Correction for CT Detection of C/C Composites

HOU Zhongjun¹ JIN Ke² ZHOU Xingming² SUN Yuewen³ XU Lin²

(1 Inner Mongolia Aerospace HongGang Machinery Corporation Limited, Hohhot 010000)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(3 Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100091)

Abstract According to the image blur problem caused by scattering photon which was received by detector in the CT detection progress of C/C composites, a mathematical model was established which described the physical processes such as absorption and scattering of photon. The mathematical model was solved by Monte Carlo method. Based on these, this work proposed a scatter correction method with photon transport and conducts comparison analysis on different size of C/C composites. The research indicates that the mathematical model built in this paper can describe the physical processes such as absorption and scattering of photons exactly, the proposed method could effectively suppress the scattering photons and improve the image quality. With the growing size of C/C composites, the effect of scattering photon on the image quality is greater. As the decreasing size of C/C composites, the greater scatter correction and high sensitive obtained. The method in this paper can effectively improve the density resolution of images and the detection ability of C/C composite defects.

Key words C/C composites, CT detection, Monte carlo, Scatter correction

收稿日期:2023-02-06

第一作者简介:侯仲军,1980年出生,高级工程师,主要从事复合材料成型工艺技术及应用技术研究。E-mail:houszj@126.com

通信作者:金珂,1984年生,博士,高级工程师,主要从事无损检测新技术的研究。E-mail:alexander_112@163.com.

0 引言

C/C 复合材料具备优异的耐烧蚀、耐高温的特点,同时还具有纤维增强复合材料可设计性强,优异的力学、热物理和抗热冲击性能,是目前为止唯一能在 2 500℃ 以上保持较高机械性能的材料^[1-2]。自 1958 年被首次发现至今,C/C 复合材料一直被认为是航空航天领域首选的高温热防护材料,被广泛应用于战略导弹弹头、发动机喷管、航天飞机鼻锥/前缘、高超声速飞行器鼻锥等关键热端部件^[3-7]。C/C 复合材料在复合成型过程中,经过多轮次的浸渍、高温裂解,材料内部容易产生密度不均、富碳以及疏松等缺陷,上述缺陷的存在将会直接影响材料的综合性能,对其内部质量有效的检测手段尤为重要。

计算机断层成像技术(CT)是利用计算技术分析射线源穿过被检物体后探测器所采集到的不同角度投影图像,通过数学变换重建出被检物体断层图像的技术。CT 检测能在不破坏材料结构的前提下完成对被检物体内部密度分布的检测,因而常用于对 C/C 复合材料的检测中^[8]。在 C/C 复合材料 CT 无损检测过程中,由于光子的散射效应导致探测器接收大量干扰信号造成图像伪影严重。本文采用基于光子输运的蒙特卡洛散射校正方法,通过对成像检测系统物理过程的模拟,降低探测器接收数据中的散射光子以达到提升图像质量的目的。

1 研究方法

1.1 蒙特卡洛算法原理

CT 检测过程中,X 射线束与材料发生相互作用,导致入射光子的能量和角度发生变化,偏离射线原有的方向,其散射公式如下:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_e(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

式中, λ 与 λ_0 为光子发生散射前后的波长, $\lambda_e = h/m_e C = 2.426 \text{ pm}$, θ 为粒子的散射角。 λ_e 为静电子的波长, h 是普朗克常量, m_e 是电子的静止质量, C 为真空中的光速。

射线源的出射光子在射线张角范围内随机分布,不同出射光子与复合材料发生多次作用,到达探测器平面的光子分布差异巨大。为获取射线与 C/C 材料作用后在探测器平面的散射光子分布,可以采用蒙特卡洛方法进行求解。

蒙特卡洛算法是一种利用重复实验对概率问题求数值解的数学方法,对于服从一定概率分布规律的核事件,对射线源出射的不同状态光子进行追踪,根据材料的物性计算不同状态光子与材料的相互作用,获得一定强度的射线束穿透物体后到达探测器处沉积能量的信号。本文采用的粒子分布为均匀分布,即光子初始角度 α 分布为:

$$F(\alpha) = \frac{2\alpha - \beta}{2\beta} \quad (2)$$

式中, β 为射线的出射张角。

对于一个能量为 E 的粒子,在物质中运动时会与物质发生散射等相互作用, λ 是粒子在介质中作用的平均自由程。 λ 越小,光子与物质发生作用的概率越大,其可由下式表示:

$$\lambda(E) = \left\{ \sum_i [n_i \cdot (\sigma_p(E) + \sigma_s(E))] \right\}^{-1} \quad (3)$$

式中, $\sigma_p(E)$ 与 $\sigma_s(E)$ 分别为能量 E 的粒子与介质发生光电效应与康普顿效应的反应截面,代表了不同作用反应的概率, n_i 为材料单位体积内的粒子数。

粒子从当前位置到下次作用的路径长度 s 的概率密度函数为:

$$p(s) = \lambda^{-1} e^{-s/\lambda} \quad (4)$$

当光子与物质发生康普顿散射时,粒子损失能量 W 和散射角 θ 的概率密度函数为:

$$p(W, \theta) = \frac{2\pi \sin\theta}{\sigma(E)} \cdot \frac{d^2\sigma(E, W, \theta)}{d\Omega dw} \quad (5)$$

式中, $\sigma(E)$ 为能量 E 的粒子与介质作用反应截面, Ω 为空间的立体角。根据上述概率密度函数对大量粒子进行数值实验,即可获得射线与物质相互作用后粒子的分布规律(图 1)。因此在被检物体的物性、射线源、探测器信息已知时,使用蒙特卡洛仿真平台通过随机化过程并加载反应截面库,模拟放射源在不同位置下的不同出射粒子与检测物体发生的物理过程(碰撞、反应、吸收等),在仿真程序中对粒子进行追踪,确定粒子在不同时刻下的位置和状态,获取到达探测器的粒子信息。

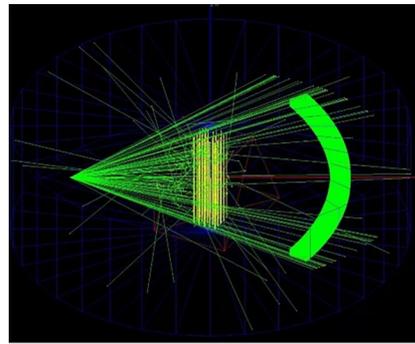


图 1 蒙特卡洛数值实验示意图

Fig. 1 Monte Carlo simulation CT detection

1.2 散射校正方法

在 CT 检测过程中,透射光子为有效信号,反映了物体在射线路径下的线衰减系数,而散射光子为干扰信号,容易导致图像模糊、对比度下降。对于大尺寸 C/C 复合材料,由于其尺寸大且检出缺陷要求的密度分辨率较高,射线散射对缺陷的有效检出影响

较大,需要采用一定的方法校正射线散射带来的噪声,消除原始信号中的散射光子成分。

结合 C/C 复合材料的检测过程,提出了基于蒙特卡洛方法的散射校正方法,具体过程如图 2 所示。首先对探测器采集到的原始投影数据利用 FDK 算法进行重建,对重建的图像(含散射因子)利用 OTSU 算法进行阈值分割,处理得到 C/C 复合材料结构件部分的

图像数据;其次,将该数据输入蒙特卡洛仿真系统构建的数值仿真实验模型进行数值分析,得到探测器接收信号中散射光子与透射光子的成分比例;基于上述计算结果,将原始投影数据扣除相应的散射光子成分,即可得到散射校正后的数据;最后对该投影数据进行 FDK 重建后可得到散射校正后的图像。

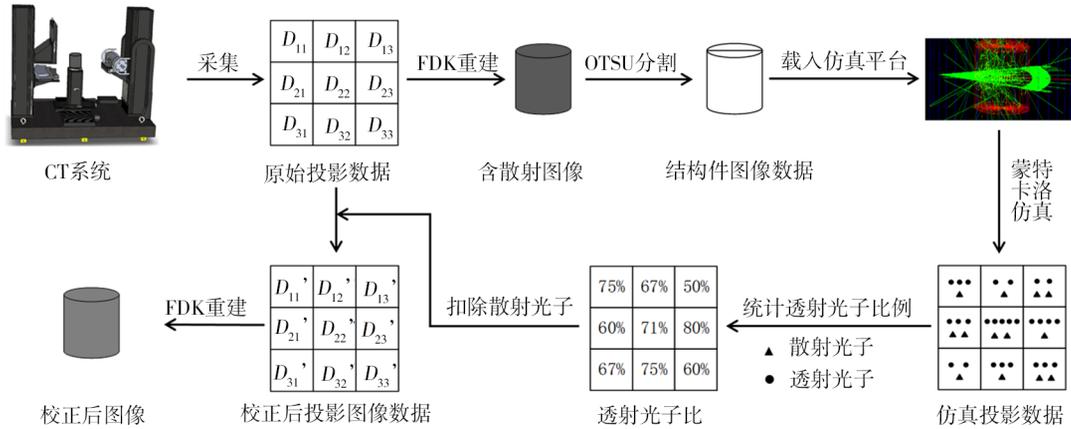


图 2 C/C 复合材料蒙特卡洛散射校正方法流程图

Fig. 2 Progress of proposed scatter correction method for C/C composites CT

2 仿真分析与实验验证

2.1 检测系统设备参数

如图 3 所示,采用 ^{60}Co 多排螺旋 CT 工业检测系

统进行 C/C 复合材料的检测,其主要设备参数如表 1 所示,该设备可检测直径 700 mm 以内的 C/C 复合材料。

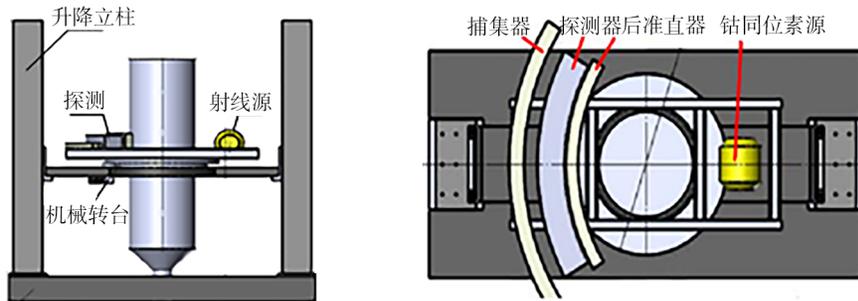


图 3 ^{60}Co 多排螺旋 CT 工业检测系统示意图

Fig. 3 Diagram of the multi-slice helical CT detection system with ^{60}Co

表 1 检测系统的主要设备参数

Tab. 1 Main parameters of the validation system

放射源类型	放射源活度	探测器类型	探测器总尺寸/mm	探测器像素尺寸/mm	源到探测器距离/mm	源到旋转中心距离/mm	螺距/mm	投影数/圈	单个投影曝光时间/s
钴 60	50 Ci	CsI 多排探测器	1472×40	3.2×5	1300	700	0.2	1000	0.24

2.2 仿真模型求解

根据 2.1 中所述设备参数在蒙特卡洛仿真软件 Geant 4 中建立了 C/C 复合材料仿真检测系统,其建模示意图如图 4 所示。

选取高度 40 mm,底面尺寸为 296 mm×592 mm 长方形构件作为检测对象,其材料为单质碳,密度为

2.0 g/cm^3 。同时为探究该系统对 C/C 复合材料不同类型缺陷的检测能力及散射的影响,梯形砖内部设置了尺寸为 $\varphi 1 \sim 7 \text{ mm}$ 的 98 个圆柱形贯通缺陷,以方形阵列排布在 C/C 复合材料内部,其间距为 40 mm。上述数字模体如图 5 所示,内部圆柱形区域为设置的贯通缺陷。

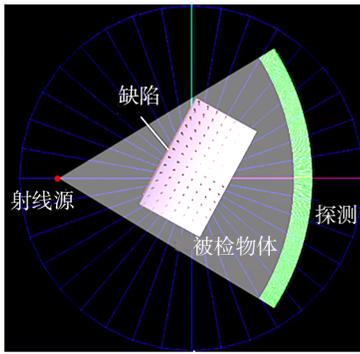


图4 GEANT4仿真实验模型

Fig. 4 Simulation model based on GEANT4

C/C复合材料CT检测系统的模拟仿真检测流程如下:

(1)放射源按照均匀分布函数采样生成随机方

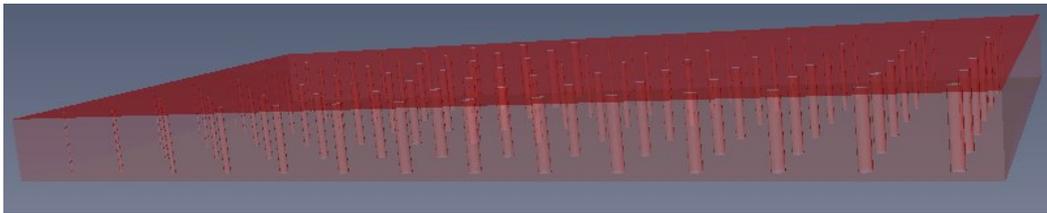


图5 C/C复合材料数值模型

Fig. 5 Model of C/C composites

2.3 验证实验

为验证建立的蒙特卡洛C/C复合材料的CT仿真模型的有效性,将实际工业检测系统与蒙特卡洛仿真模型对标准石墨构件进行验证实验。该石墨构件为两个296 mm×296 mm×40 mm方砖组成的长方形构件,构件加工有 $\varphi 1 \sim 7$ mm的98个缺陷通孔,缺陷间距为40 mm(图6)。

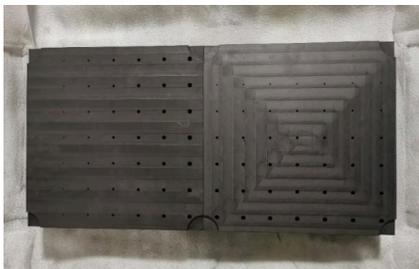


图6 验证实验用石墨构件

Fig. 6 The graphite component for validation

验证实验采用2.1中所述 ^{60}Co 多排螺旋CT工业检测系统对上述方形石墨材料进行扫描检测,该材料尽可能放置于检测系统中心位置。扫描结果由螺旋FDK算法完成预重建,重建图像的像素尺寸0.5 mm。

3 结果与讨论

3.1 仿真模型与实验检测图像验证分析

采用缺陷分辨能力(Defects Recognition Performance, DRP)以定量分析切片图像的质量以及扫描系统的缺陷检测水平:

向、随机位置的光子;

(2)光子穿透物体,与C/C复合材料发生物理作用,追踪并记录不同光子的状态,包括光子每次发生反应的坐标、能量、方向、是否被吸收、是否发生过散射;

(3)光子到达探测器单元,将沉积能量转化为投影信号,记录该信号是否为散射信号;

(4)射线源-探测器围绕物体旋转 0.36° ,返回步骤(1)进行下一个投影的采集,直至被检测物体全部扫描完成后,完成该检测平面的仿真采集过程;

(5)对采集信号进行透射、散射信号区分,对透射信号及总信号作明暗场校正后,用FDK算法进行图像重建,比较重建图像质量。

$$\text{DRP} = d/\sigma \quad (6)$$

式中, d 为缺陷区域像素均值与基体均值之差, σ 为图像的标准差。

DRP为图像中缺陷相对基体的灰度差异与图像噪声水平的比值,可描述图像中缺陷与基体的对比度,数值越高则表明系统对缺陷检出能力越强。

上述对方形石墨砖的检测结果如图7所示,其对应缺陷的DRP值如表2所示。从图7中的纵切图像可以看出,仿真图像具有较高的对比度,缺陷部位较为清晰。而实际检测图像中,缺陷部位的对比度较弱,且在横切图像中存在较为严重的环形伪影,反映在纵切图像中为中心位置的暗带,在表2中的DRP值也可以看出,对于3 mm以上较大尺寸的缺陷,实际检测图像的DRP值同样大幅低于仿真图像。这是由于探测器辐照损伤的影响,实际系统中的探测器响应不一致,同时探测器与理想探测器之间的响应线性差距较大,造成图像中出现较为严重的环形伪影,同时图像较为模糊,降低了缺陷部位的对比度。

然而从图7及DRP值可见,对于该系统,实验图像与仿真图像的极限分辨能力相同,均可较好地分辨 $\varphi 2$ mm以上的较大尺寸的缺陷,难以识别 $\varphi 1$ mm的小尺寸缺陷。这说明上述探测器辐照损伤等因素没有明显降低系统的极限检测能力。并且, $\varphi 1$ mm的缺陷无论处于碳砖中心位置还是边缘位置,在实际

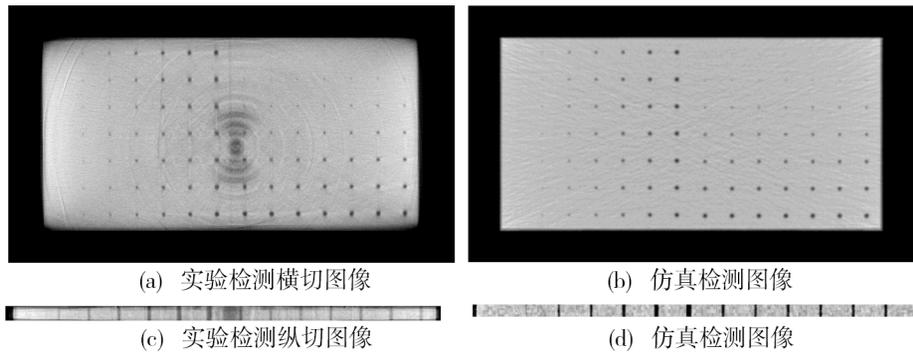


图7 石墨构件的实验及仿真检测图像

Fig. 7 Experiment and simulation results of graphite component

表2 系统对梯形石墨件中不同尺寸缺陷的分辨能力
Tab. 2 DRP metrics of the system with different defect sizes of graphite components

缺陷尺寸 /mm	DRP	
	实验检测图像	仿真检测图像
1	0.625	0.829
2	1.349	1.596
3	1.680	2.221
4	2.343	3.311
5	2.925	4.775
6	3.390	7.685
7	4.238	8.118

检测及仿真图像中均无法有效检出。而对于 $\varphi 2\text{ mm}$ 这一系统临界检出缺陷尺寸,其不同位置下的缺陷与基体相对差异没有明显差异。因此缺陷的极限检出能力主要与其物理尺寸有关,而与其在图像中的分布关系较小。而极限检测能力与系统的几何参数设计、探测器像素尺寸、采样角度、图像处理算法、放射源强度均相关,通过改善上述参数,可以进一步地提升系统的检测能力。因而利用建立的蒙特卡洛仿真平台可以有效地对该系统在不同参数下的检测能力进行分析,为改善系统检测能力提供理论依据。

仿真图像中的散射光子经过重建后如图8所示,可以看出散射射线对图像的主要影像为孔洞等结构部位及方砖四角及对角线位置。这是由于方砖对角线位置穿透距离较长,因此该位置对应的探测器接收到的透射光子成分较少,散射光子比例较高,造成该位置下探测器接收的光子数增多,对应路径下的灰度值降低。而对于缺陷孔洞等具有结构的部位,散射光子会提升探测器整体计数,造成结构部位引起的光子数变化值降低,造成图像对比度下降,使缺陷部位变得模糊。在实际检测图像与仿真图像中均可明显观测到上述现象,图像均出现了中心发暗,边缘发亮,缺陷边缘较为模糊的情况,说明建立的蒙特卡洛仿真模型可以较为准确地模拟C/C复合材料CT

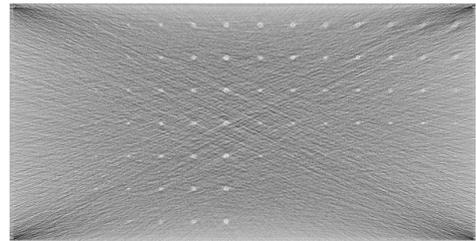
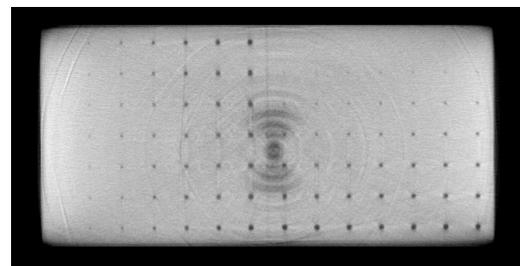


图8 仿真检测中散射光子重建图像

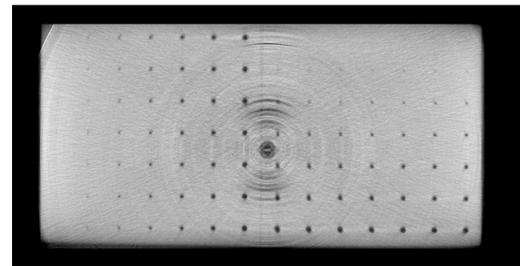
Fig. 8 Reconstruction result of the scatter part of simulation image

成像过程中的散射光子。通过仿真计算,可以获得实际检测的投影图像中的散射光子成分,对散射成分进行去除后,可以进一步地提升图像质量,改善系统检测能力。

如图9所示,经过散射校正后,图像四角发暗,缺陷附近模糊的现象大幅改善,图像更为清晰,对于 $\varphi 2\text{ mm}$ 的临界尺寸的缺陷,其相对于基体的对比度有所提升,证明提出的散射校正方法可以用于去除实



(a) 散射校正前



(b) 散射校正后

图9 散射校正前后石墨构件的实验检测图像

Fig. 9 Experiment results of graphite component before and after scatter correction

际实验中的散射光子,提升系统检出能力。

本文建立的蒙特卡洛仿真模型在验证实验中获取的仿真图像与实际检测图像取得了较为一致的结论,因此采用的蒙特卡洛算法可作为C/C复合材料CT检测成像过程的物理仿真模型,实现光子散射

校正。

3.2 部件尺寸对检测结果的影响分析

为探究散射校正后系统对不同尺寸C/C复合材料的缺陷检出能力,选取了直径分别为250、300、350、450 mm规格作为检测对象,结果见图10。

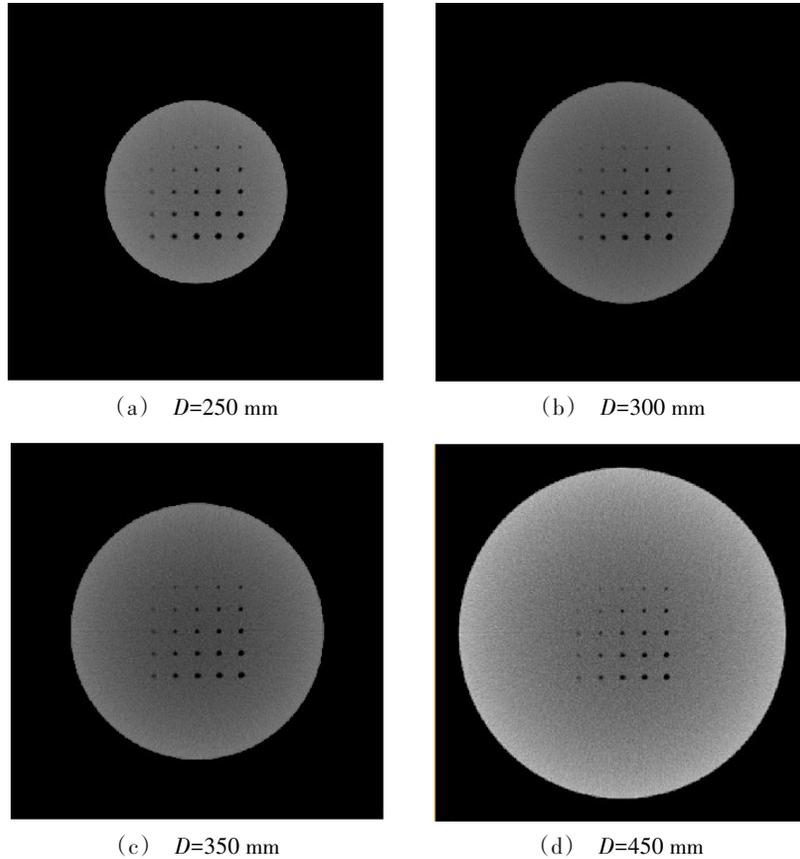


图10 不同尺寸结构件散射校正模拟后的实验结果

Fig. 10 Scatter correction results of the structural member with different size

图10可以看出,在系统参数不变的情况下,被检物体直径越小,缺陷的形状和边缘越清晰,系统对缺陷的检出能力越强。因为被检物体尺寸越小,射线穿透被检物体的衰减越少,探测器接收的光子数越多,噪声越小。散射校正后系统对5种不同密度的疏松缺陷DRP值见表4。可知,被检物体尺寸越小,系统对缺陷的检出能力越强,这与上述分析一致。

表4 散射校正后系统对不同尺寸部件的缺陷分辨能力

Tab. 4 DRP metrics of the system with different component size after scatter correction

缺陷密度 / $g \cdot cm^{-3}$	DRP			
	$D=250mm$	$D=300mm$	$D=350mm$	$D=450mm$
0	8.7016	8.5428	8.4152	7.7250
0.42	6.9338	6.8319	6.6888	6.2097
0.84	5.2093	5.1404	5.0235	4.5834
1.26	3.2373	3.1901	3.0913	2.7947
1.68	1.1778	1.1580	1.1086	0.9984

由图10及表4的DRP值分析可知,对于采用的 ^{60}Co 多排螺旋CT检测系统对 $\varphi 250 \sim 350$ mm的极限检测能力为密度 $1.26 g/cm^3$ 、 $\varphi 2$ mm的缺陷,对 $\varphi 450$ mm的极限检测能力为 $0.84 g/cm^3$ 、 $\varphi 2mm$ 。

4 结论

针对C/C复合材料CT无损检测过程中探测器接收到的散射光子成分造成的图像模糊问题,提出了一种基于光子运输的蒙特卡洛散射校正方法;利用蒙特卡洛算法对成像检测系统的探测器、射线源、被检物体进行建模,模拟了检测系统从数据采集到图像重建的全过程,结果证明:

(1)建立的模型可以准确描述CT检测过程中射线光子束的运输、吸收、散射等多物理过程;

(2)基于光子运输的蒙特卡洛散射校正方法能有效提升CT检测图像的质量,增强CT成像检测系统对C/C复合材料中疏松缺陷的检出能力;

(3)被检产品尺寸越小,散射校正效果越好,检

测灵敏度越高。

参考文献

- [1] SCHMIDT D L. Carbon-carbon composites (CCC) -ahistorical perspective [R]. Dayton: University of Dayton Research Institute, 1996, WL-TR-96-4107.
- [2] BUCKLEY J D. Carbon-carbon, an overview[J]. Am. Ceram. Soc. Bull. ,1988(67):364-368.
- [3] CHOURY J J. Carbon-carbon materials for nozzles of solid properllant rocket motors [R]. AIAA/SAE12th Propulsion Conference, 1976:26-29.
- [4] MONTAUDON M. Arane 5 SRM carbon/carbon nozzle throat:development result[R]. AIAA 95-3016.
- [5] MANOCHA L M. High performance carbon-carbon composites[J]. Sadhana, 2003, 28(1/2): 349-358.
- [6] KOWBEL W, CHRLAPP V, WITHERS J C, et al. Applications of net-shape molded carbon-carbon composites in engines[J]. J. Adv. Mater. , 1996, 27(4):2-7.
- [7] AWASTHI S. C/C composite materials for aircraft brakes[J]. Adv. Ceram. Mater. , 1988, 3(5):449-451.
- [8] 张翠翠, 潘兰, 孟妙, 等. 工业CT技术在C/C复合材料无损检测中的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2021, 46(06): 44-47.
- ZHANG Cuicui, PAN Lan, MENG Miao, et al. Application of industrial CT technology in nondestructive testing of C/C composites[J]. Process Equipment, 2021, 46(06):44-47.
- [9] 王玉. 锥形束CT图像的散射校正[D]. 中国科学技术大学, 2015.
- WANG Yu. Scatter correction for cone beam CT images [D]. University of Science and Technology of China, 2015.
- [10] 邵义文, 卢文婷, 周凌宏. 锥形束CT系统的散射校正方法分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2008(03):634-637.
- SHAO Yiwen, LU Wenting, ZHOU Linghong. Review of the methods for X-ray scatter correction in cone-beam CT system [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2008(03):634-637.
- [11] BOONE J M. Scatter correction algorithm for digitally acquired radiographs: theory and results [J]. Med. Phys, 1986, 13(3):319-328.
- [12] NAIMUDDIN S, HASEGAWA B, MISTRETTA C A. Scatter-glare correction using a convolution algorithm with variable weighting [J]. Med. Phys, 1987, 14:330-334.
- [13] LAZOS D, WILLIAMSON J F. Monte Carlo evaluation of scatter mitigation strategies in cone-beam CT [J]. Med Phys, 2010, 37(10):5456-5470.
- [14] KYRIAKOU Y, RIEDEL T, KALENDER W A. Combining deterministic and Monte Carlo calculations for fast estimation of scatter intensities in CT [J]. Phys Med Biol, 2006, 51(18):4567-86.
- [15] LO J Y, FLOYD C E, BAKER J A, et al. Scatter compensation in digital chest radiography using the posterior beam stop technique [J]. Med Phys, 1994, 21(3):435-43.