

引文格式: 蒋明繁, 邓晓东, 史泉颖, 等. 快速扫描对SiC/SiC复合材料工业CT检测图像质量影响[J]. 航空制造技术, 2025, 68(16): 32-42.

JIANG Mingfan, DENG Xiaodong, SHI Xiaoying, et al. Impact of fast scan on image quality of industrial CT inspection for SiC/SiC composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(16): 32-42.

快速扫描对SiC/SiC复合材料工业CT检测图像质量影响*

蒋明繁¹, 邓晓东¹, 史泉颖¹, 陈子木², 洪智亮¹, 鲁亮¹, 常建卫¹

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;

2. 英华检测(上海)有限公司, 上海 201108)

[摘要] SiC/SiC 复合材料因其优异的高温性能和轻质特性, 广泛应用于航空发动机高温部件制备。然而, 材料制备过程中易产生气孔、分层等缺陷, 影响材料性能, 因此需要准确、高效的无损检测方法。大量研究结果表明, CT 检测是 SiC/SiC 复合材料最有效的检测方法之一, 但传统 CT 检测通常需要数小时, 时间长、成本高, 而快速扫描可在样品旋转时连续曝光, 可显著缩短扫描时间。通过试验对比不同扫描模式下的图像分辨率、噪声分布及缺陷识别能力, 本文提出了优化扫描参数的方法, 在保证图像质量的同时提高检测效率。试验结果表明, 快速扫描技术在空间分辨率无明显下降的情况下, 可大幅提升扫描速度。虽然图像噪声随采样幅数减少而增加, 但通过调整电流等参数, 可有效降低噪声影响。本文提出了在图像分辨率、噪声及扫描时间之间取得平衡的策略, 为 SiC/SiC 复合材料快速工业 CT 检测工程化应用提供重要参考。

关键词: 快速扫描; CT 检测; SiC/SiC 复合材料; 采样幅数; 扫描电流

中图分类号: V250.2

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.16.032



蒋明繁

副总经理, 高级工程师, 从事无损检测工艺、生产管理、供应商管理等研究。

SiC/SiC 复合材料作为一种高性能陶瓷基复合材料 (Ceramic matrix composites, CMCs), 具有轻质、耐高温、抗氧化以及良好的高温力学性能等优异特性, 已成为高推重比航空发动机燃烧室和涡轮等高温热端部件的重要选材。法国 Snecma 公司、美国 NASA 生产的 SiC/SiC 复合材料调节片、密封片已成功装机应用, 相对于高温合金减重达到 50%, 且高温疲劳性能更优; 美国 GE 公司在 LEAP 和 GEnx 发动机中大规模采用 CMC 制备燃烧室火焰筒内外环、涡轮外环和导向叶片等热端部件^[1-5]。但是, SiC/SiC 复合材料制备需要经

历复杂的热过程和化学反应, 材料容易产生缺陷^[2-6], 主要包括气孔、夹杂、分层、裂纹、未渗透、密度不均、残余 Si、缺丝以及纤维错排等。这些缺陷按形貌可分为点状缺陷 (气孔、夹杂、残余 Si 等), 线性缺陷 (针状孔), 面积型缺陷 (分层、裂纹) 和体积型缺陷 (未渗透、低密度区)。此外, 在高温、氧化、腐蚀、热疲劳及冲击载荷等恶劣工况下长时间服役, SiC/SiC 复合材料还会进一步产生新的损伤^[3]。这些原始制备缺陷和服役损伤的存在、累积和扩展会降低 SiC/SiC 复合材料的性能, 对构件质量、服役寿命和可靠性带来严重影响。因此, 通过有

* 基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB3707705)。

效的无损检测技术对 SiC/SiC 复合材料进行快速、精准的检测,提供准确定位、定量、定性的完整缺陷检测数据,以支撑构件内部质量和寿命评估。

目前, SiC/SiC 复合材料常用无损检测方法主要有:超声检测、射线检测(包括胶片射线和数字射线检测)、CT 检测和红外热成像检测等。超声检测方法能检测 SiC/SiC 复合材料内部分层、裂纹、气孔、夹杂等缺陷^[7-11],并在一定程度上实现材料孔隙率或密度不均等缺陷的评估,尤其适用于结构简单的零件(如火焰筒等回转体)。由于受材料组织噪声、声衰减、各向异性以及检测参数影响,超声检测对缺陷的定性解释较为困难,例如,难以准确区分纤维束内部的小分层、裂纹和气孔缺陷,仅能通过回波高度评估缺陷当量尺寸。此外,超声检测对探头和待检零件之间耦合性要求高,且受限于超声检测设备机械扫查可达性,不适用于型面复杂结构制件(如 SiC/SiC 涡轮外环、涡轮导叶及动叶等)的缺陷检测。射线检测方法主要适用于检测 SiC/SiC 复合材料内部的体积型缺陷,对分层等面积型缺陷不敏感,通常作为辅助检测手段用于 SiC 复合材料中夹杂、气孔、密度不均等体积缺陷的检测^[7,10-11]。红外热成像检测对 SiC/SiC 复合材料内部分层比较敏感,通过采集材料表面红外热传导曲线表征材料热传导性能,从而建立材料密度、热导率和材料力学性能的关系^[10-13]。受材料表面状态、热传导性能以及检测深度影响,红外热成像检测对深度较大缺陷检测的缺点是检测灵敏度和尺寸测量精度较低^[12]。

相比之下, X 射线 CT 检测能直观呈现材料内部结构、密度和缺陷信息,是一种三维可视化的无损检测方法,在对 SiC/SiC 复合材料内部纤维排布、微结构、缺陷表征方面具有其

他常规无损检测方法无法比拟的优势,尤其适用于涡轮外环、导叶等结构复杂、尺寸较小的 SiC/SiC 复合材料零部件的检测^[6,14]。X 射线 CT 检测系统主要性能指标包括可检试样范围、检测时间和图像质量,其中图像质量是 CT 系统核心指标,主要包括空间分辨率、对比度分辨率和伪像。对于特定的 CT 系统,待检样品尺寸越大,穿透试样所需能量越大;射线源焦点尺寸越大,放大倍数越低;图像不清晰度和像素尺寸越大,空间分辨率越低,最小可识别的缺陷尺寸越大。为了保证缺陷的可靠检出,CT 图像的体素尺寸应小于缺陷尺寸的 1/3~1/5^[14]。在实验室,高分辨的微纳级 CT 检测方法被广泛应用于试样级材料内部组织、微结构、缺陷的表征。刘海龙等^[15]基于 CT 原位试验研究平纹 SiC/SiC 复合材料拉伸损伤演化机理,在最小 5.5 μm 的体素分辨率下观察试验过程中材料的损伤演化过程,发现了基体横向裂纹、层间开裂和纤维束纵向基体开裂。Guo 等^[16]采用 YXLON Y.CT 型 CT 平台对 2D 织物 SiC/SiC 复合材料试样进行压缩试验,在 9 μm 的体素分辨率下观察到材料内部的微结构、孔隙分布以及损伤演化过程,包括基体开裂、层间开裂以及纤维束断裂等。此外,借助同步辐射 X 射线 CT,研究人员甚至可以在 0.7 μm 以下的图像分辨率下,实现单根纤维、微裂纹等的有效识别^[17-19]。

在工业 CT 检测条件下,由于受到射线源焦点尺寸、探测器大小、探元尺寸以及待检零件尺寸和结构等因素限制,无法获得实验室条件下小尺寸样品所能达到的亚微米级分辨率,难以分辨微小缺陷。在分辨率为几十微米的工业 CT 系统中,如何实现最小缺陷的检出能力,已成为评价 SiC/SiC 复合材料工业 CT 检测能力的重要指标。此外, X 射线 CT 检测虽然具有很高的分辨率,但检测周期

普遍较长,大尺寸零件往往需要数个小时才能完成,这不仅降低了检测效率,还增加了生产成本,严重制约了 SiC/SiC 复合材料在航空发动机等关键领域的规模化应用。因此,需研究高分辨快速 CT 检测技术,为 SiC/SiC 复合材料的质量控制、寿命评估和可靠性分析提供更高效的技术支撑,推动其在航空航天等高端制造领域的产业化应用。Zwanenburg 等^[20]分析了 596 篇含 CT 扫描参数的研究论文,总结了快速 CT 的试验步骤、扫描参数、图像质量影响因素和优化方法,提出通过最大化焦点尺寸(增大功率)、像素合并以及减少采样幅数(投影数量)至 60% 标准采样幅数(Nyquist 采样定理)等方法来提高检测速度。这些优化方法主要基于实验室条件或同步辐射设备,难以直接应用于工业 CT 检测环境。此外,由于 SiC/SiC 复合材料衰减系数与金属等传统材料存在显著差异,相应的缺陷 CT 检测效果明显不同,因此需要针对 SiC/SiC 复合材料开展快速 CT 检测方法的专门研究。

本文聚焦于 SiC/SiC 复合材料快速 CT 检测技术的工程化应用。通过研究采样幅数、扫查电流等快速扫描技术关键参数,对图像分辨率、噪声和缺陷检出概率(Probability of detection, POD)的影响,建立适用于 SiC/SiC 复合材料的快速 CT 检测优化模型,探索在保证图像质量和缺陷检出能力的前提下,显著提高检测效率的技术途径,以期对 SiC/SiC 复合材料的 CT 快速检测工业化应用提供可靠的无损检测解决方案。

1 试验及方法

1.1 试验材料

1.1.1 CMC 工程试验件

为了研究 CT 快速扫描对 CMC 工程试验件缺陷识别的影响,并确保试验结果能够最大程度地反映实际构件的检测规律,本研究选取了含典

型制备缺陷的 SiC/SiC 复合材料工程件(涡轮外环)作为试验对象,通过设置不同扫描参数获得工程件的 CT 检测图像数据,分析其对 CT 图像质量以及缺陷识别能力的影响。工程件采用 MI 工艺制备,增强体为 SiC 纤维,采用预浸带铺层结合反应熔渗技术成型获得尺寸约为 97 mm × 48 mm × 4 mm (长 × 宽 × 高)的致密化 SiC 基体。该工程件内部包括气孔、分层等 SiC/SiC 复合材料主要缺陷类型。

1.1.2 CT 检测标准试块

为了研究快速扫描参数对 CT 系统空间分辨率的影响,本研究采用标准试块进行 CT 系统空间分辨率测试,重点分析采样幅数、曝光参数等对 CT 系统空间分辨率影响机制。工程检测中,一般采用标准圆柱试块进行空间分辨率测试,然而不同材质的圆柱标准试块测试结果存在较大差异。为了排除标准试块材质的影响,本文同时采用铝合金标准圆柱试块和 QRM (QRM 公司)标准试块开展对比试验,分析快速扫描参数对空间分辨率的影响。

(1) 铝合金圆柱标准试块。试验件选择与实际 SiC/SiC 工程件密度相当的 6061 铝合金圆柱标准试块进行系统性能测试,试块直径 24 mm,高度 32 mm,按 ASTM E1695 和 GB/T 35391 标准进行加工测试。

(2) QRM 标准试块。如图 1 所示, QRM 标准试块由 2 片树脂镶嵌的 Si 晶片组成,呈圆柱结构,外圆直径 9.92 mm,内置的两块 Si 晶片呈垂直分布,上面预制了不同尺寸的点阵和线对。其中,不同线对的线宽分别为 5 μm、10 μm、15 μm、20 μm、25 μm、30 μm,通过最小线对的分辨来表征 CT 系统空间分辨率。

1.2 CT 检测设备

本试验采用 phoenix v|tome|x M240 微焦点工业 CT 设备,配备 240 kV/320 W 微米焦点 X 射线管,射线

管采用钨靶和铍窗,最小焦点尺寸 4 μm,探测器尺寸为 400 mm × 400 mm,探元尺寸为 200 μm,内置 FBP 算法重建的图像。

1.3 试验方法

1.3.1 常规 CT 扫描

常规 CT 扫描通常采用“go & stop”扫描模式,即“静止-曝光”模式,样品在曝光采集数据时静止,采集完一张图像后,旋转至下一个曝光角度再静止、曝光,重复该过程直至完成 360° 角扫描。

1.3.2 快速 CT 扫描

与常规扫描不同,快速扫描(Fast scan)模式省去了常规扫描静止等待的时间,在样品旋转的同时进行曝光。快速扫描时样品在运动状态下曝光,图像采样时有可能产生拖影,引起伪像。由于省去了旋转与静止时间,快速 CT 扫描时间要小于相同工艺下的常规扫描。两种扫描模式下的扫描时间计算方法分别如式(1)和式(2)所示。

$$T_{\text{norm}} = (T_{\text{exp}} + T_{\text{rot}}) \times N \quad (1)$$

$$T_{\text{fast-scan}} = T_{\text{exp}} \times N \quad (2)$$

式中, T_{exp} 表示单次曝光的时间, T_{rot} 表示试样单次旋转运动所需时间, N 表示采样幅数。

1.3.3 QRM 标准试块试验

使用 QRM 标准试块内置线对卡作为空间分辨率标定工具,采用 phoenix v|tome|x M240 设备,分别设置常规扫描和快速扫描两种模式,对

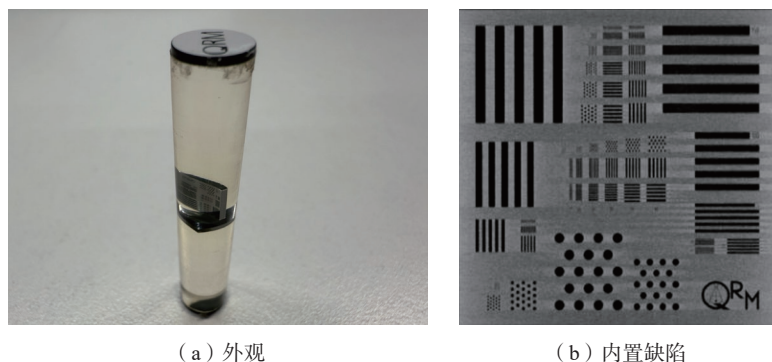
比相同条件下图像的空间分辨率随采样幅数的变化规律,分析两种扫描方法的差异。

探测器中心区域具有更高的线性响应和更低的噪声水平,为避免探测器边缘由于光线不均匀性导致的几何失真,扫描区域设定于探测器中心 1/2 位置,由此采用 1600 张采样幅数(即 $\pi/2 \times$ 采集幅宽),同时为避免透射率过高以及空气灰度过低,且考虑与后续圆柱标准试块试验参数一致,选定扫描电压 160 kV、电流 90 μA。在保持上述参数不变的条件下,通过调整采样幅数,分析其对图像质量的影响,具体试验参数设置见表 1,表中 FDD 表示射线源到探测器的距离, FOD 表示射线源到检测样品的距离。

1.3.4 铝合金圆柱标准试块试验

在 phoenix v|tome|x M240 设备上,采用铝合金圆柱标准试块,依据 QRM 标准试块测试参数进行分辨率测试。对于空间分辨率,采用 ASTM E1695 标准测试方法计算调制率为 10% 时的空间分辨率,具体试验参数见表 2。

针对噪声特性,以圆柱中心为基准,沿径向选取多个特征区域进行噪声评估,分析噪声分布规律。自旋转中心出发,沿径向不同位置选取 0.5 mm 的矩形区域(图 2),依据公式(3)计算各区域噪声,研究噪声 σ 的分布规律。



(a) 外观

(b) 内置缺陷

图 1 QRM 标准试块

Fig.1 Image of QRM phantom

表 1 QRM 标准试块试验参数

Table 1 Experiment parameters for QRM phantom

试验组	扫描模式	电压/kV	电流/ μ A	FDD/FOD	曝光时间/ms	采样幅数/张	体素尺寸/ μ m	扫描时长
1	常规扫描	160	90	776/30	500	1600	7.8	18 min 40 s
2	快速扫描	160	90	776/30	500	1600	7.8	13 min 20 s
3	快速扫描	160	90	776/30	500	1280	7.8	10 min 40 s
4	快速扫描	160	90	776/30	500	960	7.8	8 min
5	快速扫描	160	90	776/30	500	640	7.8	5 min 20 s
6	快速扫描	160	90	776/30	500	320	7.8	2 min 40 s

表 2 铝合金标准圆柱试验参数

Table 2 Experiment parameters for aluminum alloy cylinder phantom

试验组	扫描模式	电压/kV	电流/ μ A	FDD/FOD	曝光时间/ms	采样幅数/张	体素尺寸/ μ m	扫描时长
1	常规扫描	160	90	805/82	500	1600	20	18 min 40 s
2	快速扫描	160	90	805/82	500	1600	20	13 min 20 s
3	快速扫描	160	90	805/82	500	1280	20	10 min 40 s
4	快速扫描	160	90	805/82	500	960	20	8 min
5	快速扫描	160	90	805/82	500	640	20	5 min 20 s
6	快速扫描	160	90	805/82	500	320	20	2 min 40 s
7	快速扫描	160	90	805/82	500	120	20	1 min

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^m (\mu_i - \bar{\mu}) / (m-1)}{\bar{\mu}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, m 表示感兴趣区域图像像素个数, μ_i 表示第 i 个像素的 CT 灰度值, $\bar{\mu}$ 表示平均灰度值。

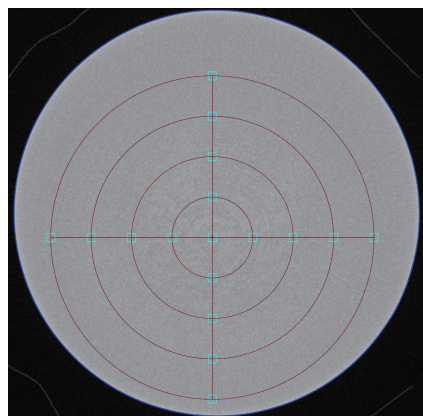


图 2 圆柱试块噪声测量区域划分示意图 (圆心即为扫描旋转中心)

Fig.2 Schematic diagram of noise measurement area division for aluminum cylinder phantom

1.3.5 SiC/SiC 复合材料工程件试验

挑选含典型自然缺陷(包括气孔、分层等)的 SiC/SiC 复合材料工程试验件进行 CT 检测试验,对比 SiC/SiC 复合材料工程件快速扫描参数对图像质量和缺陷识别能力的影响。CMC 工程件 CT 扫描包含两组试验:采样幅数影响试验和扫描电流影响试验,扫描参数分别见表 3 和表 4。

2 结果与讨论

2.1 QRM 标准试块试验

图 3 展示了常规扫描和快速扫描两种模式下, QRM 标准试块的空间分辨率测试结果。可以看出,在其他参数不变时,常规扫描模式下测得空间分辨率为 33.3 LP/mm (线宽 15 μ m);而快速扫描模式下测得空间分辨率同样为 33.3 LP/mm。在快速扫描模式下, CT 图像的空间分辨率并

未显著降低,与常规扫描模式下的结果基本一致。这一结果表明,快速扫描模式在显著缩短检测时间的同时,仍能保持较高的空间分辨率。进一步分析两种扫描模式下对应 15 μ m 线对丝的对比度,结果显示:常规扫描模式下的对比度为 15.10%,而快速扫描模式下的对比度为 17.96%。结果表明,快速扫描模式下的对比度不仅没有降低,反而实现了约 19% 的对比度提升。这一现象归因于快速扫描重建算法的优化,表明快速扫描模式在提升检测效率的同时,成功保持了图像对比度分辨率^[21]。

图 4 为不同标准试块空间分辨率测试结果。由快速扫描模式下 QRM 标准试块空间分辨率随采样幅数变化的规律可见,采样幅数从 1600 张降到 320 张的过程中,空间分辨率稳定,表明该范围内采样幅数对图像空间分辨率没有影响。然而,当采样

表3 CMC 工程件采样幅数影响试验参数

Table 3 Experiment parameters of number of projections for CMC part

试验组	扫描模式	电压/kV	电流/ μ A	FDD/FOD	曝光时间/ms	采样幅数/张	体素尺寸/ μ m	扫描时长
1	常规扫描	180	150	805/80	250	1200	20	11 min 12 s
2	快速扫描	180	150	805/80	250	1200	20	5 min
3	快速扫描	180	150	805/80	250	900	20	3 min 45 s
4	快速扫描	180	150	805/80	250	600	20	2 min 30 s
5	快速扫描	180	150	805/80	250	300	20	1 min 15 s

表4 CMC 工程件扫描电流影响试验参数

Table 4 Experiment parameter for CMC part scanning current

试验组	扫描模式	电压/kV	电流/ μ A	FDD/FOD	曝光时间/ms	采样幅数/张	体素尺寸/ μ m	扫描时长/min
1	快速扫描	180	150	805/80	250	1200	20	5
2	快速扫描	180	200	805/80	250	1200	20	5
3	快速扫描	180	250	805/80	250	1200	20	5
4	快速扫描	180	300	805/80	250	1200	20	5

幅数进一步减少到 120 张时,空间分辨率急剧下降,从 1600 张幅时的 33.3 LP/mm 下降到 25 LP/mm,下降幅度为 24.9%,表明过少的采样幅数会对图像分辨率产生较大影响。

2.2 铝合金圆柱标准试块试验

(1) 空间分辨率变化规律。由图 4 中铝合金圆柱标准试块常规扫描和

快速扫描模式下空间分辨率与采样幅数之间的关系曲线可见,快速扫描模式下,当采样幅数在 1600~320 之间时,空间分辨率在 22.0~23.3 LP/mm 之间,变化幅度小于 5.6%;但当继续减少采样幅数至 120 后,空间分辨率急剧下降,从 1600 幅时的 23.3 LP/mm 下降到 120 幅的 16.0 LP/mm,

下降了 31.3%。可以看出当采样幅数降到约 600 张以下时,图像空间分辨率会明显下降,对图像细节分辨率产生较大影响,为了保证图像质量,采样幅数不宜低于 600 张(采用 FBP 算法时)。这一现象与 Villarraga-Gómez 的研究相吻合^[22]。

由图 4 可见 QRM 标准试块空间分辨率测试结果基本稳定,而铝合金圆柱标准试块空间分辨率测试结果有一些波动。这种差异是因为 QRM 标准试块上丝径为梯度分布,不同组线对线宽按 5 μ m、10 μ m、15 μ m、20 μ m、25 μ m、30 μ m 6 个等级分布,对应空间分辨率分别为 100 LP/mm、50 LP/mm、33.3 LP/mm、25 LP/mm 和 16.7 LP/mm。测试时通过可识别的丝径间距判断空间分辨率,当空间分辨率处于同一区间时,只能读到该区域的最大线宽,分辨率波动不大时读到的线宽为同一个值,22.0~23.3 LP/mm 刚好处于 25~30 μ m 线宽之间,该数值低于 QRM 标准试块测试的 15 μ m 线宽。这是因为铝合金试块和 QRM 试块在材质(树脂基体)和结构存在差异。铝合

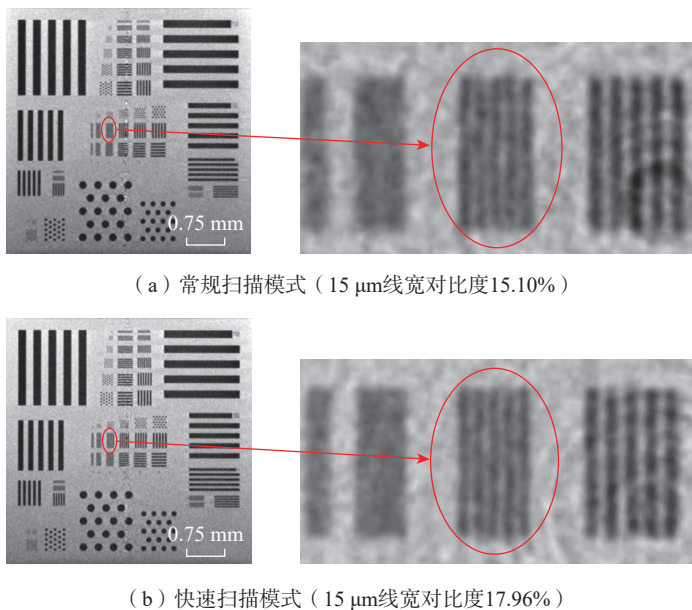


图3 两组扫描模式下 QRM 标准试块空间分辨率对比

Fig.3 Comparison of spatial resolution of QRM phantom in different scan modes

金试块尺寸和材料衰减更大, CT 检测过程中产生更多的噪声, 图像空间分辨率比 QRM 标准试块测得的低。此外, 当采样幅数在 1600 时, 常规扫描和快速扫描两种模式下测得的空间分辨率相近, 变化仅为 4.6%, 说明快速扫描在效率大幅提升 28.57% 的情况下, 其空间分辨率基本不受影响。

(2) 噪声分布规律。图 5 是铝合金圆柱标准试块图像噪声随旋转中心距边缘位置距离的变化趋势。可见噪声在中心点出现最大值, 由旋转中心向边缘递减, 快速扫描与常规扫描的噪声分布趋势一致。噪声随距中心点的距离增大而降低, 主要有如下两个原因: 其一, 由于在圆柱中心区域, X 射线穿过路径增加, 导致康普顿散射作用增强, 过量的散射产生了高于边缘区域的噪声。这一现象与 Guleng 等的研究结果一致^[23]。其二, 重建算法优化, 即 FBP (滤波反投影) 算法会在中心区域出现较大的噪声。Zhang 等^[24]研究表明, 迭代重建 (IR) 算法在中心区域噪声减少方面比 FBP 算法更有优势, 因为迭代重建算法在散射噪声降低方面更好, 与本试验结果一致。

图 6 是噪声随采样幅数 (N) 变化的关系曲线。发现噪声随着采样幅数增加而降低, 理想情况下 σ 与采样幅数 $N^{1/2}$ 成反比^[25], 通过幂函数 $\sigma = a \times N^b$ 拟合, 得到系数 b , 可见噪声与 N 的 0.396 次方成反比。这一结果与噪声和采样幅数 (N) 成 $1/\sqrt{N}$ 的变化规律存在一些偏差^[25], 这些偏差与射束硬化伪像、重建算法引入的额外噪声的影响有关。

2.3 CMC 工程件 CT 试验

2.3.1 对比度影响

采用 CMC 工程件进行不同模式下的 CT 扫描试验, 在常规扫描与快速扫描模式下对典型缺陷的对比度差异进行分析。其中缺陷对比度 μ_D 是通过缺陷灰度曲线图记录缺陷灰度 I_D 及背景灰度 I_B , 采用公式 (4)

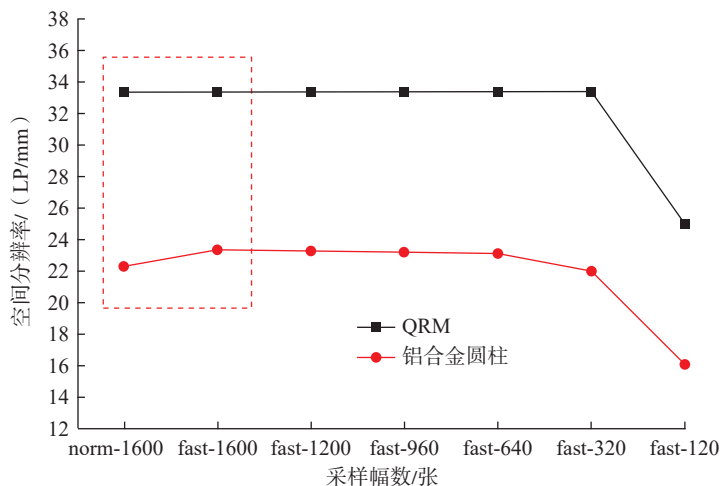


图 4 不同采样幅数下标准试块空间分辨率 (MTF10) 变化

Fig.4 Phantom spatial resolution variation at different number of projections

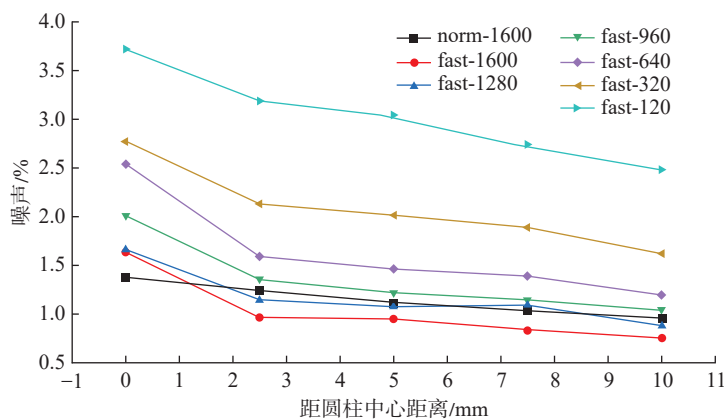


图 5 不同采样幅数下铝合金圆柱试块各区噪声变化

Fig.5 Noise variation of aluminum alloy cylinder phantom at different number of projections

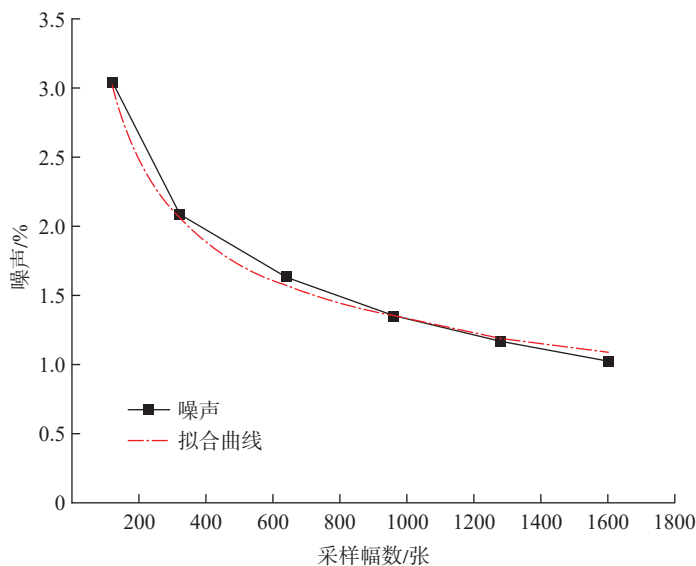


图 6 铝合金圆柱试样噪声随采样幅数变化曲线

Fig.6 Fitting curve of noise with number of projections for aluminum alloy cylinder phantom

计算。

$$\mu_D = (I_D - I_B) / I_B \quad (4)$$

图7是CMC工程件典型缺陷CT图像对比。其中图7(a)是典型气孔缺陷扫描结果,常规扫描模式下缺陷对比度为46.7%;快速扫描模式下在采样幅数为1200张时,气孔缺陷对比度为48.86%,与常规扫描差异不大,当采样幅数降至300张时,对比度为37.07%,对比度下降11.8%。表明,随着采样幅数减少,缺陷对比度递减,缺陷难以识别。可见,当采样幅数降至300张时,较小的1#气孔难以识别,明显降低了小缺陷的检出能力。这种差异可以从图8的缺陷灰度分布图看出,随着采样幅数减少,缺陷对比度下降。

图7(b)是典型分层缺陷扫描结果,常规扫描模式下缺陷对比度为44.05%;快速扫描模式下在采样幅数为1200张时分层缺陷对比度为41.72%,与常规扫描差异不大,当采样幅数降至300张时,对比度为28.42%,对比度下降13.3%。

从图9的典型缺陷对比度和采样幅数关系曲线可以看出,缺陷对比度随采样幅数降低呈现下降趋势,当采样幅数在600张以上时,对比度随采样幅数减少变化较缓慢;而当采样幅数降到600张以下时,缺陷对比度下降幅度急剧增大,可见采样幅数不宜小于600张。

2.3.2 噪声影响

图10是CMC工程件在不同扫

查模式和不同采样幅数下CT图像噪声的变化曲线。红框内数据显示,当采样幅数为1200张时,常规扫描图像噪声为2.12%,快速扫描图像噪声为1.93%,与常规扫描相比,快速扫描图像噪声没有增大,反而略有降低。对于快速扫描,当采样幅数逐步降低,图像噪声呈现先缓慢增加后迅速增加的趋势,表明采样幅数对图像噪声有较大影响。

对比铝合金圆柱标准试块试验,在CMC工程件中,从旋转中心出发,沿径向不同位置,选取相同大小(0.2 mm × 0.2 mm)的矩形区域,计算各区域噪声,分析噪声分布规律。如图11所示,噪声由旋转中心向边缘递减,快速扫描与常规扫描的噪声分布趋势一致,噪声随采样幅数减少总体呈现上升趋势,结果与圆柱标准试块试验一致。进一步观察发现,随着与中心点距离增大,噪声逐步小,在中心点附近噪声出现最大值,常规扫描和快速扫描有相同的趋势。在采样幅数为1200张时,快速扫描的图像噪声略微下降,这一观察与铝合金圆柱标准试块的结论一致。随着采样幅数降低,CMC工程件中心点噪声呈现逐步增高的趋势。此外,可以看到当距离中心点1.5 mm左右时噪声分布出现波动,采样幅数为900张时噪声略微降低,随着采样幅数进一步降低,噪声呈现增高的趋势,这一现象与铝合金圆柱试块噪声单调的变

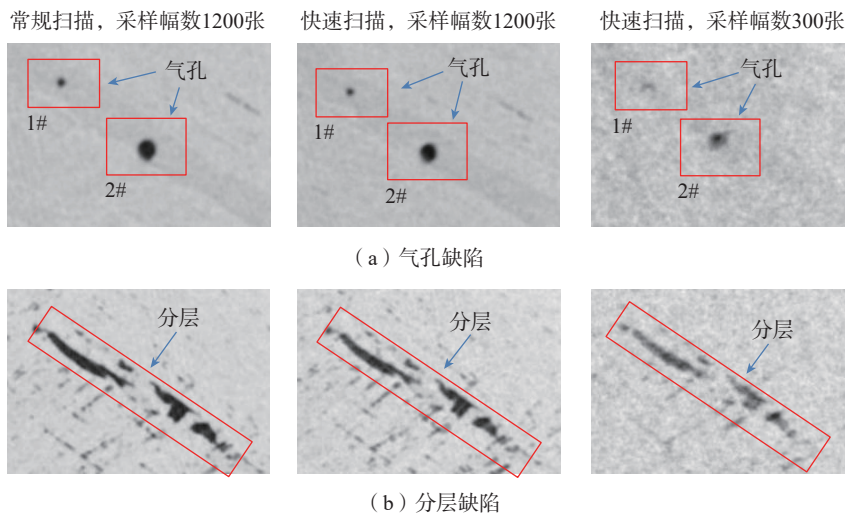


图7 CMC工程件典型缺陷CT图像对比度变化
Fig.7 CT image of typical defects in CMC part

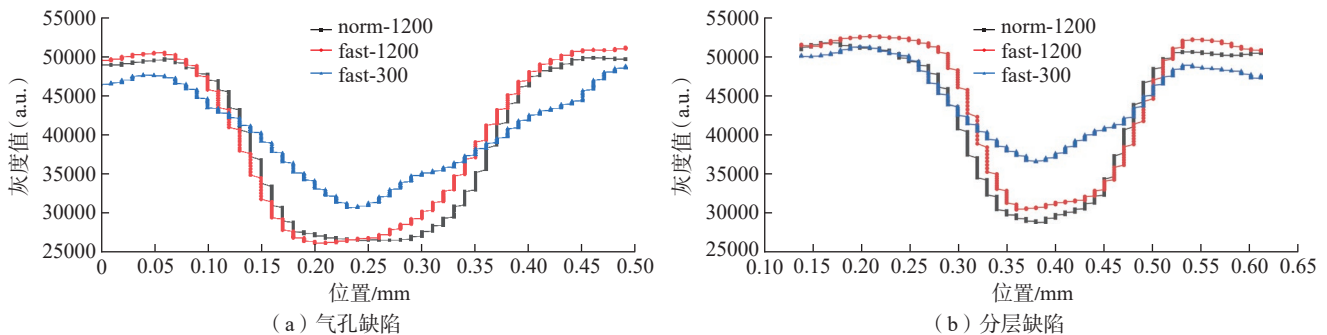


图8 CMC典型缺陷灰度分布随采样幅数变化曲线

Fig.8 Gray level curve of defect in CMC part with number of projections

化规律存在差异,表明工程件的结构会对 CT 图像噪声分布产生影响,实际检测过程中需要根据具体检测对象结构特点分析噪声影响,且应避免

中心点位置处于重要检测部位。

2.3.3 空间分辨率影响

图 12 对比了不同扫查模式和采样幅数下,图像空间分辨率对点状缺

陷识别的影响。可见,当采样幅数为 1200 张时,同一缺陷在常规扫描模式和快速扫描模式下均可见;但在快速扫描模式下,当采样幅数下降至 300 张时,噪声增大,会导致图像空间分辨率下降,小缺陷无法被识别。可见,快速扫描模式下,采样幅数急剧降低时,图像空间分辨率降低,导致小缺陷难以被识别,因此应控制采样幅数不能过低。

2.3.4 扫描电流影响

通过以上分析可见,图像噪声和对比度随着快速扫描采样幅数降低而变差。为了提高缺陷对比度和减低噪声,设计了扫描电流对缺陷对比度以及噪声的影响试验。在其他扫描参数不变的情况下,通过设置不同电流进行扫描(表 5),分析电流对缺陷对比度和噪声的影响。

图 13 是快速扫描模式中不同扫描电流下 CMC 工程件 CT 检测图像。可见,随着不断增大电流,噪声有效减少(减少幅度 17.61%)的同时缺陷对比度几乎没有明显变化(波动范围 1.74%);当电流持续增大,探测器过曝光,因此通过提高电流来降低噪声只在一定范围内适用,实际工程应用中扫查工艺的制定需综合考虑工件材质、尺寸、形状、待检缺陷尺寸等因素选择最佳扫描参数。

图 14 是从 CMC 工程件 CT 图像上通过提取边缘灰度分布曲线计算的空间分辨率与扫描电流的关系曲线。可以看出,在其他参数不变的情况下,图像空间分辨率随扫描电流增大而降低,当电流从 $150\ \mu\text{A}$ 增加到 $250\ \mu\text{A}$ 时,图像空间分辨率从 $9.15\ \text{LP/mm}$ 逐渐下降到 $8.2\ \text{LP/mm}$,下降了 10.4%。可见增大电流虽然能减低噪声,但却降低了图像空间分辨率。

2.3.5 缺陷检出率(POD)影响

图 15 对比了快速扫描模式下不同尺寸范围的缺陷检出率随着采样幅数 N 降低的变化规律,其中每个尺寸区间内统计了 30 个缺陷的识别情

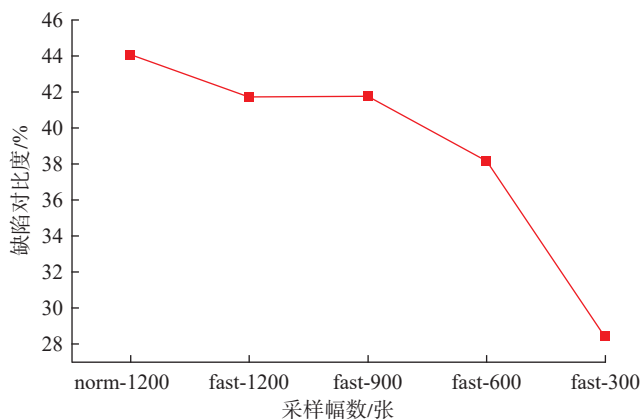


图 9 不同采样幅数下 CMC 典型缺陷对比度变化

Fig.9 CT contrast of defects in CMC part at different number of projections

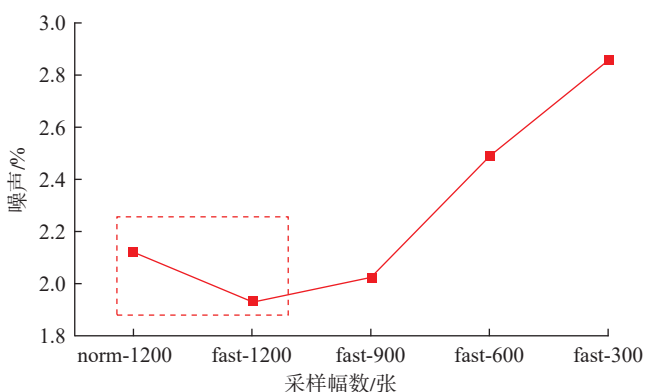


图 10 不同采样幅数下 CMC 工程件噪声变化

Fig.10 Noise variation in CMC part at different number of projections

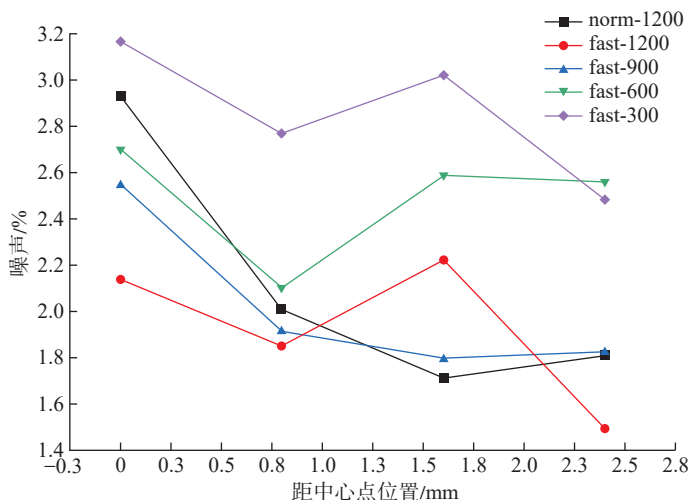


图 11 不同扫描模式和采样幅数下 CMC 工程件各区噪声变化

Fig.11 Noise variation in different zones in CMC part at different scan modes and different number of projections

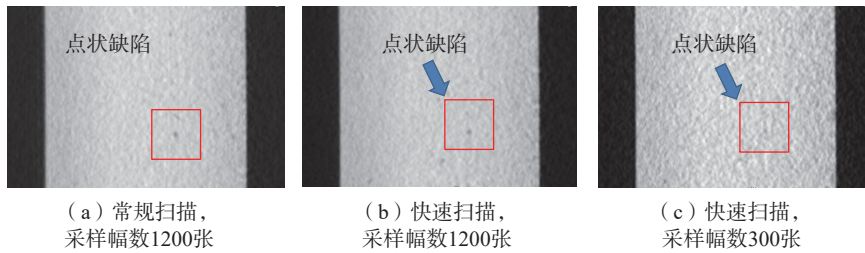


图 12 不同扫描模式以及采样幅数下点状缺陷 CT 图像
Fig.12 CT images of point defect in CMC at different scan modes and different number of projections

表 5 CMC 工程件扫描电流试验结果

Table 5 Results of noise and contrast at different tube current for CMC part

试验组	电流/ μA	噪声/%	对比度/%
1	150	1.93	41.73
2	200	1.65	42.35
3	250	1.59	43.71
4	300	探测器过曝光	探测器过曝光

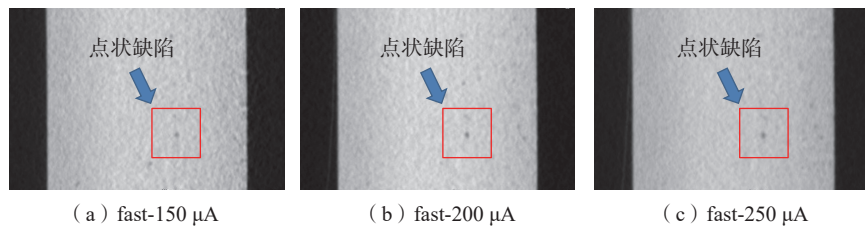


图 13 快速扫描模式下,不同电流对应 CMC 工程件 CT 图像噪声成像结果

Fig.13 CT images of point defect in CMC at different tube currents in fast scan mode

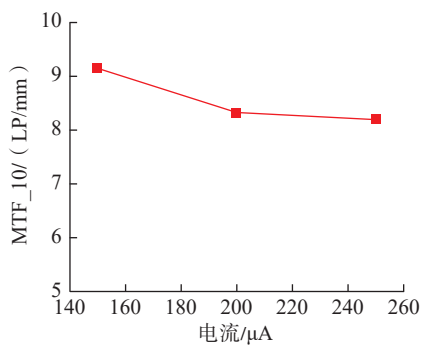


图 14 扫描电流对 CMC 工程件 CT 图像空间分辨率影响

Fig.14 Effect of scanning current on CT spatial resolution of CMC part

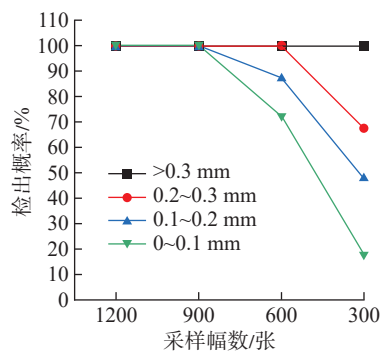


图 15 快速扫描模式下,采样幅数与 CMC 工程件缺陷 CT 检出概率关系曲线
Fig.15 Curve of probability of detection (POD) vs number of projections for CMC part in fast scan mode

况,每个缺陷的检出情况以常规扫描模式下 1200 张采样幅数时缺陷的检出率为基准进行统计。可以看出,随着 N 减少,不同尺寸区间的缺陷检出率呈现逐步降低的趋势。当 N 为 900

张时,各尺寸区间缺陷检测率基本不受影响。当 N 为 600 张时,0.2~0.3 mm 缺陷检出率为 100%,0.1~0.2 mm 缺陷检出率为 87.5%,0.1 mm 以下

缺陷检出率为 72.5%,可见缺陷越小其检出率受影响越大。当 N 减小到 300 张时,0.2~0.3 mm 缺陷检出率降为 67%,0.1~0.2 mm 缺陷检出率降为 47.5%,0.1 mm 以下缺陷检出率为 17.6%, N 越小缺陷检出率越小,缺陷越不容易检出。对于工程件而言,一般要求可靠检出 0.3 mm 的缺陷,可见 N 不宜小于 600。

2.4 分析与讨论

通过不同扫描模式下对 QRM 和圆柱标准试块的检测试验可见,在扫描参数不变的情况下,快速扫描模式下扫描时间相比于常规扫描缩短了 28.57%,而系统的空间分辨率与常规扫描相当,并未降低。对于工业 CT 检测,空间分辨率决定了系统可检最小缺陷的极限(一般最小可检缺陷是空间分辨率的 3~5 倍)。空间分辨率保持不变是快速扫描 CT 检测能够应用于 SiC/SiC 复合材料工程件的前提。标准试块的试验结果验证了快速扫描在 CMC 工程件 CT 检测上应用的可行性。

在快速扫描模式下,随着采样幅数逐步降低,空间分辨率呈现先缓慢降低,然后急剧降低的趋势,试验结果表明,该趋势的拐点出现在采样幅数约 600 张附近。相比而言,图像噪声随采样幅数降低逐步增大,研究表明噪声与采样幅数 N 的 0.396 次方成反比。对于 CMC 工程件,图像噪声同样随着采样幅数降低而增大,缺陷对比度降低,与标准试块的规律基本一致。上述结果表明,快速扫描的采样幅数可以最低降至 600 张左右,继续降低会对图像质量产生较大影响。此外,噪声分布呈现中间高、边缘低的趋势,实际检测过程中应避免中心点位置处于重要检测部位,减少噪声的影响。

缺陷检出率随着采样幅数的降低呈现下降的趋势,且缺陷尺寸越小,其检出率受采样幅数的影响越大。为了保证工程件检测条件下 0.3

mm 以上缺陷能被可靠检出,采样幅数不宜低于 600 张。

噪声随采样幅数减少而增加的影响可以在一定程度上通过增大扫描电流而降低,当电流从 150 μA 增大到 250 μA ,噪声减少 17.61%。然而增大电流虽然能减低噪声,但却降低了图像空间分辨率。此外电流的增加受到探测器接收光子能力的限制,当增大到的一定值时,无法继续提高。相比噪声而言,对比度随电流增大影响较小,仅增加 4.7%。因此,实际 CMC 工程件检测过程中,需要根据缺陷的识别能力和检出率适当调整电流,平衡噪声和空间分辨率的影响。

3 结论

(1) 快速扫描技术在显著缩短扫描时间的同时,能够保持 SiC/SiC 复合材料 CT 图像空间分辨率基本稳定。快速扫描模式下,采样幅数在 600 以上时,空间分辨率与常规扫描相当,且对比度略有提高。SiC/SiC 复合材料工程样件表明,快速扫描技术可在不牺牲图像质量的前提下,大幅缩短扫描时间,相对常规扫描而言,检测效率提高 3~4 倍。

(2) 采样幅数是影响 SiC/SiC 复合材料 CT 图像质量的关键因素之一。研究发现,当采样幅数从 1600 减少至 600 时,图像空间分辨率保持基本稳定;而当采样幅数进一步减小至 300 时,空间分辨率急剧下降,噪声显著增加。此外,采样幅数减少还会导致缺陷对比度降低,尤其是小缺陷检出率显著下降。因此,为保证图像质量和缺陷检出率,采样幅数应不低于 600 张。

(3) 扫描电流对图像噪声有显著影响。随着电流增加,图像噪声降低。相比于噪声,缺陷对比度随电流增大提高不明显。然而,电流过大可能导致探测器过度曝光,从而影响图像质量。此外,CMC 工程件检测结果表明,增大电流会导致空间分辨率降低,电

流对空间分辨率、对比度和噪声的这种相悖影响需要根据实际零件结构、尺寸以及要求识别的最小缺陷尺寸进行综合考虑,获得最佳平衡。

(4) 噪声与采样幅数 N 的 0.396 次方成反比,采样幅数越小噪声越大。此外噪声分布呈现“中心高、边缘低”的规律,在实际检测中,应尽量避免将关键区域置于旋转中心位置,以减少噪声对缺陷识别的干扰。

参考文献

- [1] 张立同, 成来飞. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 1-6.
- [2] ZHANG Litong, CHENG Laifei. Discussion on strategies of sustainable development of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 1-6.
- [3] 高铁, 洪智亮, 杨娟. 商用航空发动机陶瓷基复合材料部件的研发应用及展望[J]. 航空制造技术, 2014, 57(6): 14-21.
- [4] GAO Tie, HONG Zhiliang, YANG Juan. Application and prospect of ceramic matrix composite components for commercial aircraft engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(6): 14-21.
- [5] 焦健, 孙世杰, 焦春荣, 等. SiC_f/SiC 复合材料涡轮导向叶片研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4342-4354.
- [6] JIAO Jian, SUN Shijie, JIAO Chunrong, et al. Research progress of SiC_f/SiC turbine guide vanes: A review[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4342-4354.
- [7] CORMAN G S, LUTHRA K L. Development history of GE's prepreg melt infiltrated ceramic matrix composite material and applications[M]//Comprehensive Composite Materials II. Amsterdam: Elsevier, 2018, 5: 325-338.
- [8] STEIBEL J. Ceramic matrix composites taking flight at GE aviation[J]. American Ceramic Society Bulletin, 2019, 98(3): 30-53.
- [9] 樊俊铃, 张伟, 宁宁, 等. 航空发动机陶瓷基复合材料无损表征技术研究进展[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 13-26.
- [10] FAN Junling, ZHANG Wei, NING Ning, et al. Research progress of nondestructive characterization technologies of aeroengine ceramic matrix composites[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 13-26.
- [11] 刘松平, 刘菲菲, 章清乐, 等. SiC_f/SiC 复合材料无损检测与评估技术进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(19): 24-30.
- [12] LIU Songping, LIU Feifei, ZHANG Qingle, et al. Progress in non-destructive testing and evaluation of SiC_f/SiC composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(19): 24-30.
- [13] NAM K W, KIM J W, HINOKI T, et al. Application of ultrasonic inspection to characterization of advanced SiC/SiC composites[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 417(1-3): 353-355.
- [14] GYEKENYESI A L, MORSCHER G N, COSGRIFF L M. In situ monitoring of damage in SiC/SiC composites using acousto-ultrasonics[J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37(1): 47-53.
- [15] SUN J G, VERRILLI M, STEPHAN R, et al. Nondestructive evaluation of ceramic matrix composite combustor components[C]. AIP conference proceedings, 2003: 1011-1018.
- [16] WANG B, ZHONG S C, LEE T L, et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(4): 168781402091376.
- [17] 邓晓东, 成来飞, 梅辉, 等. C/SiC 复合材料的定量红外热波无损检测[J]. 复合材料学报, 2009, 26(5): 112-119.
- [18] DENG Xiaodong, CHENG Laifei, MEI Hui, et al. Infrared thermal wave imaging for nondestructive detection and measurement of the C/SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(5): 112-119.
- [19] MEI H, LI H Q, DENG X D, et al. Nondestructive investigation of density defect in C/SiCs and its effect on the mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 553: 45-50.
- [20] GAO Y T, HU W F, XIN S F, et al. A review of applications of CT imaging on fiber reinforced composites[J]. Journal of Composite Materials, 2022, 56(1): 133-164.
- [21] 刘海龙, 张大旭, 祁荷音, 等. 基于 X 射线 CT 原位试验的平纹 SiC/SiC 复合材料拉伸损伤演化[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(10): 1074-1083.
- [22] LIU Hailong, ZHANG Daxu, QI Heyin, et al. Tensile damage evolution of plain weave SiC/SiC composites based on in situ X-ray CT tests[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(10): 1074-1083.
- [23] GUO W N, GAO Y T, SUN L J. In-situ CT characterization of 2D woven SiCf/SiC

composite loading under compression[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2022, 29(1): 394–402.

[17] BALE H, BLACKLOCK M, BEGLEY M R, et al. Characterizing three-dimensional textile ceramic composites using synchrotron X-ray micro-computed-tomography[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, 95(1): 392–402.

[18] WRIGHT P, FU X, SINCLAIR I, et al. Ultra high resolution computed tomography of damage in notched carbon fiber—Epoxy composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42(19): 1993–2002.

[19] MOFFAT A J, WRIGHT P, BUFFIÈRE J Y, et al. Micromechanisms of damage in 0° splits in a [90/0] s composite material using synchrotron radiation computed tomography[J]. *Scripta*

Materialia, 2008, 59(10): 1043–1046.

[20] ZWANENBURG E A, WILLIAMS M A, WARNETT J M. Review of high-speed imaging with lab-based X-ray computed tomography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(1): 012003.

[21] SUN W J, CHRETIEN S, BIGURI A, et al. The realisation of fast X-ray computed tomography using a limited number of projection images for dimensional metrology[J]. *NDT & E International*, 2023, 137: 102852.

[22] VILLARRAGA-GÓMEZ H, SMITH S T. Effect of the number of projections on dimensional measurements with X-ray computed tomography[J]. *Precision Engineering*, 2020, 66: 445–456.

[23] GULENG A, BOLSTAD K,

DALEHAUG I, et al. Spatial distribution of noise reduction in four iterative reconstruction algorithms in CT—a technical evaluation[J]. *Diagnostics*, 2020, 10(9): 647.

[24] ZHANG H, WANG J, ZENG D, et al. Regularization strategies in statistical image reconstruction of low-dose X-ray CT: A review[J]. *Medical Physics*, 2018, 45(10): e886–e907.

[25] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ Á, THOMPSON A, KÖRNER L, et al. Review of the influence of noise in X-ray computed tomography measurement uncertainty[J]. *Precision Engineering*, 2020, 66: 382–391.

通信作者: 邓晓东, 高级工程师, 博士, 研究方向为材料及构件无损检测与评价技术。

Impact of Fast Scan on Image Quality of Industrial CT Inspection for SiC/SiC Composites

JIANG Mingfan¹, DENG Xiaodong¹, SHI Xiaoying¹, CHEN Zimu², HONG Zhiliang¹,
LU Liang¹, CHANG Jianwei¹

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd, Shanghai 200241, China;

2. Yinghua Inspection and Testing (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai 201108, China)

[ABSTRACT] Due to their excellent high-temperature performance and lightweight properties, SiC/SiC composites are widely used in high-temperature components of aerospace engines. However, defects like porosity and delamination can occur during their fabrication, affecting material performance and necessitating efficient non-destructive testing methods. Extensive research indicates that CT inspection is one of the most effective methods for detecting defects in SiC/SiC composites. Traditional CT scanning often requires several hours, leading to high time consumption and costs. In contrast, the fast scan mode continuously exposes the sample during rotation, significantly reducing scanning time. While fast scanning may introduce issues like image trailing and noise, this study compares image resolution, noise distribution, and defect detection capabilities across different scanning modes. It proposes methods to optimize scanning parameters, aiming to enhance detection efficiency without compromising image quality. Experimental results indicate that fast scan technology can substantially increase scanning speed without significant loss in spatial resolution. Although image noise increases as the number of projections decreases, adjusting parameters such as current can effectively mitigate noise effects. The study concludes by proposing strategies to balance image resolution, noise, and scanning time, providing technical support for fast scan of industrial CT testing for SiC/SiC composites.

Keywords: Fast scan; CT inspection; SiC/SiC composites; Number of projections; Scanning current

(责编 大漠)