

# 多向编织 C/C 复合材料显微结构的 $\mu$ -CT 研究

宋永忠<sup>1</sup> 王俊山<sup>1</sup> 傅 健<sup>2</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

(2 北京航空航天大学数字辐射成像技术研究中心,北京 100191)

**文 摘** 以多向编织 C/C 复合材料为研究对象,对其内部组织结构进行了 CT 扫描,通过对投影旋转中心校正、噪声抑制、环状伪影校正等数据进行了处理。结果表明:经过处理数据,图像质量明显改善,提高了材料内部微结构细节的辨识程度,为 C/C 复合材料内部微结构三维重构提供了良好的基础。

**关键词** C/C 复合材料,显微 CT,微观结构

## Microstructure of 3D Carbon/Carbon Composites Measured With Micro-CT

Song Yongzhong<sup>1</sup> Wang Junshan<sup>1</sup> Fu Jian<sup>2</sup>

(1 National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 Research Center of Digital Radiation Imaging Technique, Beihang University, Beijing 100083)

**Abstract** Different dimensional specimens of 3D carbon/carbon composites were made. The microstructure of the 3D carbon/carbon composites was investigated with micro-CT. The correction of projective images rotational center, denoising, and ring artifacts correction were performed. Results show that the micro-CT images of 3D carbon/carbon composites are improved through data processing. And the microstructures are accurately displayed.

**Key words** C/C composites, Micro-CT, Microstructure

### 0 引言

C/C 复合材料具有耐高温、耐烧蚀、耐粒子侵蚀和高温强度高优异性能,已成为固体火箭发动机喉衬、再入飞行器头部的首选耐热材料<sup>[1]</sup>,其中三维多向编织 C/C 复合材料是近年来发展起来的一种新型超高温耐热材料。纤维预制体采用 3D、4D、5D 及 6D 碳纤维编织成型,经后续工艺制成的多向编织 C/C 复合材料表现出了良好的抗分层能力、抗热震性能及对厚结构部件的适应性<sup>[2-3]</sup>。由于制备工艺原理原因,C/C 复合材料内部必然存在着各相的非均匀、随机分布,各种规格的孔隙、裂纹、基体碳分布于碳纤维骨架当中。而且碳纤维骨架也可能会由于复合过程中存在的各种外力导致的扭曲变形、移位。而 C/C 复合材料内部微观结构的随机分布对其力学、热物理性能具有较大的影响。

目前可用于复合材料内部质量无损检测的方法

较多,如超声波法、X 射线法、计算机层析照相法(CT)、声-超声法、声发射法、热成像法、微波法、渗透法等。就目前技术条件而言,CT 技术是可以作为对 C/C 复合材料内部各种组织结构单元的位置及尺寸分布进行准确表征的检测手段和质量评价方法之一<sup>[4-8]</sup>。

工业 CT 技术应用于 C/C 复合材料的缺陷检测和性能分析与表征已有十多年历史。研究表明,工业 CT 技术可有效检出复合材料宏观缺陷的位置及尺寸、密度的变化、异型结构的形状及尺寸、物体内部的杂质及分布等<sup>[9-12]</sup>。

本文以多向编织 C/C 复合材料为研究对象,对其内部组织结构进行了扫描,通过对投影旋转中心校正、噪声抑制、环状伪影校正等数据后处理对投影数据进行了处理,分析了处理前后对图像质量的影响。

### 1 实验

收稿日期:2010-12-15

作者简介:宋永忠,1976 年出生,博士,高级工程师,主要从事 C/C 复合材料的研究

## 1.1 原料

多向编织 C/C 复合材料采用拉挤的细碳纤维刚性棒,构成  $z$  向增强网络,并用软碳纤维纱机织成其余三向,组成软硬混编三维碳纤维预制体。纤维预制体经化学气相沉积增密、沥青浸渍炭化和最终石墨化处理工艺制成高密度的多向编织 C/C 复合材料。

## 1.2 性能测试

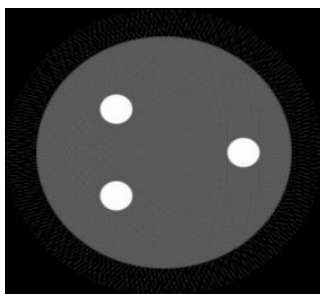
采用德国 YXLON 公司 Y-Tiger 三维显微 CT 系统进行,该系统采用  $3\ \mu\text{m}$  的射线源。

## 2 结果与讨论

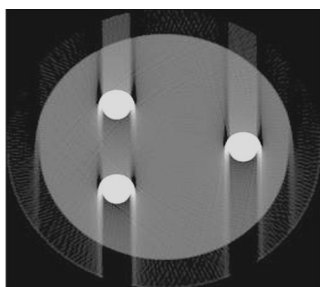
采用 CT 系统对复合材料的内部信息进行了扫描,它利用 X 射线对复合材料做  $360^\circ$  周向透照扫描,然后采用一定的重建算法根据探测器获取的射线数字投影序列重构出复合材料被扫描区域的射线衰减系数分布图像,反映构件内部结构或特征的三维信息。然而由于显微 CT 的某些固有特性,一些因素制约了系统成像的性能指标,进而影响了复合材料内部微结构的精确表征,需对采集图像进行后处理以提高其质量。

### 2.1 投影旋转中心估计

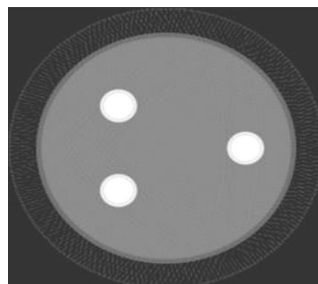
转台旋转中心(COR)是三维显微 CT 重建坐标系的坐标原点,它的定位直接决定着 CT 图像的质量,其定位误差会引起 CT 图像的伪影。如果 COR 定位存在误差,则重建图像也相应存在误差,外在表现为 CT 图像的伪影。在用滤波反投影算法重建 CT 图像时,COR 的定位误差导致投影滤波结果的误差和投影地址的计算误差。二者共同导致了 CT 图像的伪影。计算机仿真结果如图 1 所示。



(a) 精确图像



(b) 平行束重建图像



(c) 扇束重建图像

图 1 COR 定位误差引起的伪影

Fig. 1 Artifact caused by error of COR orientation

可见,COR 的定位误差,对于平行束扫描,会引起谐叉(tuning fork)伪影,而对于扇束扫描,则会引起重影伪影,误差更大,伪影的表现形式更加复杂。显然,此类伪影退化图像,降低了图像质量,给复合材料结构内部缺陷的判读和定性带来了不必要的麻烦。

文献[13]中提到的确定 COR 的方法主要分为针对平行束扫描和针对扇束扫描的方法两类。现存方法的局限性限制了三维显微 CT 的实际工程应用,急需寻找一种精度高、简便的 COR 确定方法,本文提出了基于对称投影的转台旋转中心自动确定方法。在 CT 扫描过程中,对于视角为  $\beta$  和  $\beta+\pi$  的投影,两者具有一定的几何对称关系,此处称为对称投影。不难发现,从射线源发射并经过转台旋转中心的射线束在两个投影视角下透过的物体路径相同。如图 2 所示, $s$  为探测器探元的位置坐标, $s_0$  为转台旋转中心投影到探测器平面上的坐标。利用上述规律,可自动确定旋转中心位置。

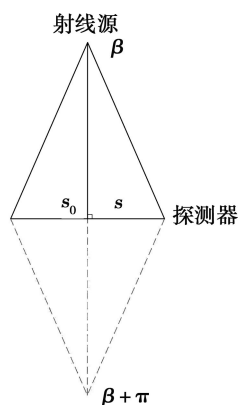


图 2 对称投影示意图

Fig. 2 Diagram of symmetric projections

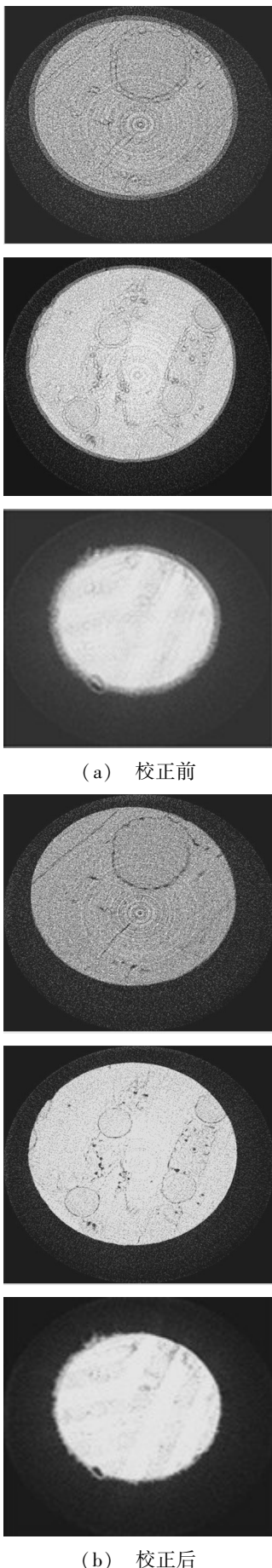
为验证该方法的有效性,以实际复合材料构件为对象,在 Y. Tiger 三维显微 CT 系统上按照如下成像条件进行了实验。图 3 为重建中心校正前后重建得到的复合材料三维显微 CT 断层图像。可知,新方法显著提高了图像的细节分辨能力。

## 2.2 噪声抑制

显微 CT 的噪声主要来自两个过程,即 Radon 正变换过程和逆变换过程,由于 Radon 逆变换本身是一个数学变换,不涉及物理因素,因此不是引起噪声的主要因素。Radon 正变换中影响显微 CT 噪声程度的主要因素有量子噪声、电子噪声、读数与量化随机噪声等。其中电子噪声、读数与量化随机噪声近似服从高斯分布。电子噪声是由电子随机热运动而造成的,是探测器内部各种电子电路产生的一种随机噪声。对于射线成像而言,电子噪声和读数与量化噪声只占总噪声很小的一部份,可以通过图像帧叠加的方式抑制。由光子起伏引起的量子噪声是工业显微 CT 图像的主要噪声来源。另外,由于显微 CT 采用微米级焦点的射线源,而 X 射线是由高速电子轰击阳极靶上射线源焦点位置而产生的,且高速电子的能量 99% 以上转化成了热,这使得阳极靶的热负荷很重,为了不致使阳极靶损坏,射线管功率不能太高,因此发射出来的射线强度也比较低,所以显微 CT 成像属于低剂量的 X 射线成像,这增大了量子噪声的幅度,对比常规焦点射线源成像,显微成像的投影图像和 CT 图像均有更大的噪声。高噪声导致成像系统密度分辨率的降低,同时也降低了显微 CT 的工程应用性。

从成像过程的角度来讲,CT 噪声抑制方法主要可以分为成像过程和图像后处理降噪方法。而图像后处理降噪方法又可以分为基于投影域的方法和基于 CT 图像域的方法。这主要是由于:投影域的噪声是依赖于信号强度的乘性噪声,而 CT 图像域的噪声通常是近似于白噪声的加性噪声。根据对现有降噪算法的分析,考虑到成像速率和设备使用寿命以及成像的纵向空间分辨率,成像过程降噪方法并不可取。而在图像后处理算法方面,上述方法都还不能很好的在降低噪声的同时保持图像的空间分辨率。基于此,本文提出基于改进的 NL-means 算法的降噪算法。

NL-means 算法的思想起源于邻域滤波算法,是对邻域滤波算法的一种推广,但是该方法的权值不再是由图像中的单个像素灰度值和其他像素作对比而得到,而是对像素周围整个区域的灰度分布做整体对比,根据灰度分布的相似性决定权值。虽然  $p$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  具有相同的灰度,但是  $q_1$ 、 $q_2$  的邻域分布与  $p$  更接近,因此贡献较大的权值,而  $q_3$  对  $p$  则贡献较小的权值。显然,这使求得的权值相对邻域滤波算法中的权值更加合理。NL-means 算法虽然有很好的降噪效果,但缺点是会在图像的平滑区域引入人工伪影,随



(a) 校正前

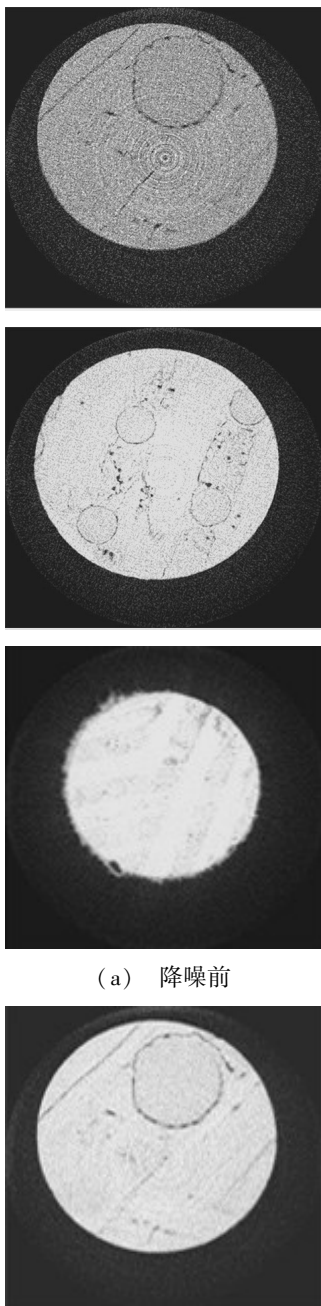
(b) 校正后

图 3 重建中心校正前后获得的 CT 断层图像

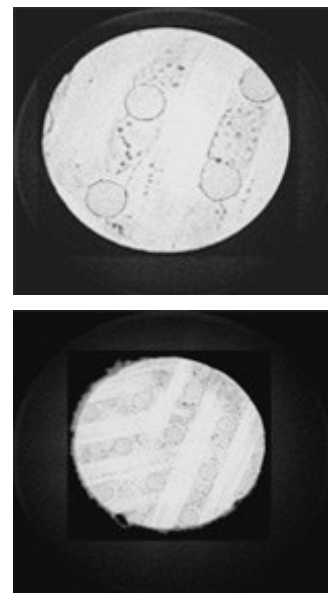
Fig. 3 Comparison of CT images results with orientation fitting

随着搜索域的增大人工伪影逐渐减弱,但是图像逐渐变得模糊,空间分辨率受到影响。为此本文对其改进以适用于复合材料显微 CT 图像的降噪,即在算法中加入了梯度信息,这使得图像像素邻域之间的相关性下降,但是在图像纹理丰富的地方,下降的幅度大,而在图像的平滑区域下降的幅度小,则加入梯度信息后,可以通过增大搜索域,使得平滑处更加平滑,消除人工伪影,而图像纹理丰富的地方并未被模糊。在实际操作中  $\nabla v$  可以利用具有抑制噪声效果的 sobel 算子来计算。

为验证该方法的有效性,以实际复合材料构件为对象,在 Y. Tiger 三维显微 CT 系统上按照如下成像条件进行了实验。根据图 4 可知,新方法显著降低了图像噪声。



(a) 降噪前



(b) 降噪后

图 4 降噪前后获得的 CT 断层图像

Fig. 4 Comparison of CT images results with noise reduction

### 2.3 环状伪影校正

从本质上讲,环状伪影是由  $360^\circ$  内投影探测中单个或多个探元通道的误差造成的。在执行滤波反投影重建算法的过程中,一次孤立的投影探测误差被反投影过程映射为 CT 图像中的一个条纹,如果同样的误差重复出现在  $360^\circ$  范围内的多个投影视角下,条纹的尾巴将被抵消,并产生一个环。环状伪影产生示意图如图 5 所示。

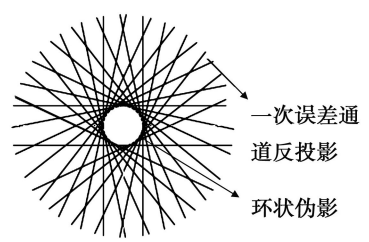


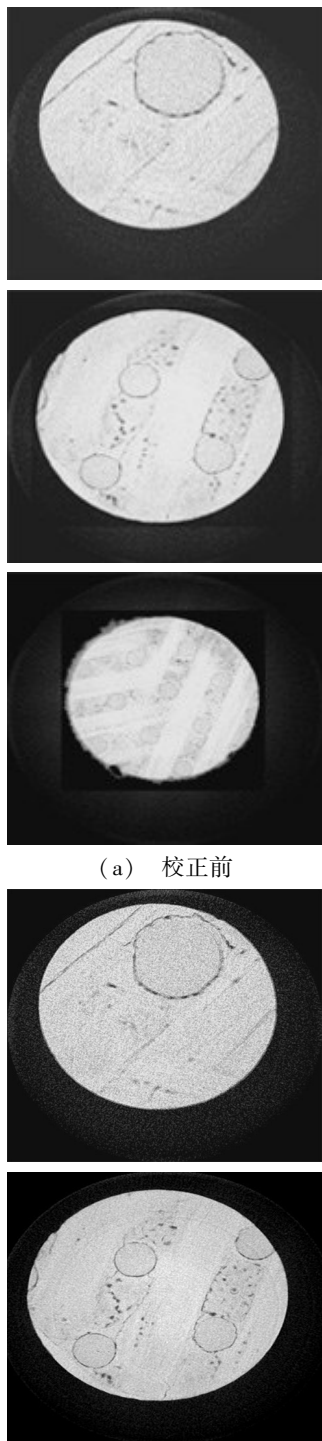
图 5 环状伪影产生示意图

Fig. 5 Diagram of ring artifacts fitting

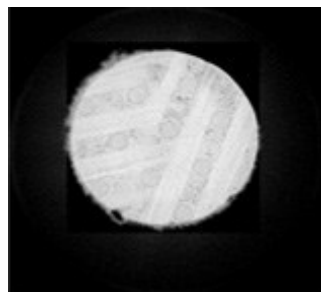
为了有效消除环状伪影,且不引起成像空间分辨率的下降,提出了基于 B 样条曲线拟合的环状伪影校正,来抑制环状伪影。其基本原理如下:某个探元的响应不一致性只会影响正弦图相应一列的数据,在正弦图上表现为竖直的条纹,该列数据相对于相邻几列数据会呈现较为明显的数值变化,在同一行数据中表现为高频成份。基于上述分析,可以将正弦图所有行叠加平均,得到一行数据。若不存在探元响应不一致性,此行数据会非常光滑,因为即使某个视角下的投影存在高频信息,随着投影视角的改变,此高频信息在投影正弦图每行数据上的坐标位置会随之改变,当  $M$  行数据叠加平均后,此高频信息也将得到抑制;若存在探元响应不一致性,由于它只反映在投影正弦图某一固定列上,叠加平均后,高频信息会依然存在;

叠加结果中的高频成份反映了探元响应的不一致性。B 样条函数拟合逼近作为一种分段多项式逼近方法,不但能够保证拟合的曲线充分逼近实验数据,且能保证拟合曲线的光滑性。所以可以对  $M$  行数据叠加平均后的一行数据进行 B 样条曲线拟合,拟合的曲线认为是探测器的理想响应。依据理想响应和实际采集到的投影数据,就可以估计出各个探元的增益因子。进而可以对各个探元进行不一致性校正。

为验证该方法的有效性,以实际复合材料构件为对象,在 Y. Tiger 三维显微 CT 系统上按照如下成像条件进行了实验。根据图 6 可知,新方法显著降低了环状伪影。



(a) 校正前



(b) 校正后

图 6 校正前后获得的 CT 断层图像

Fig. 6 Comparison of CT images results with ring artifacts fitting

### 3 结论

(1) 显微 CT 可对 C/C 复合材料内部微结构进行表征。

(2) 通过投影旋转中心校正、噪声抑制和环状伪影校正可以大幅度提高 CT 断层图像的图像质量,显著提高了 C/C 复合材料内部微细结构。

### 参考文献

- [1] 李贺军. C/C 复合材料[J]. 新型炭材料, 2001, 16(2): 79-80
- [2] Chernikov V N, Kesternich W, Ullmaier H. Macrostructure and microstructure of the carbon fiber composite UAM92-5D-B[J]. Journal of Nuclear Materials. 1997, 244(1): 1-15
- [3] 尹健, 熊翔, 张洪波, 等. 固体火箭发动机喷管用 C/C 复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2003, 8(3): 231-236
- [4] 王峰, 张扬. 无损检测在复合材料中的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(3): 26-28
- [5] 唐桂云, 王云飞, 吴东辉, 等. 先进复合材料的无损检测[J]. 纤维复合材料, 2006(1): 33-36
- [6] 吴东流, 郭伟明. 复合材料计算机层析照相检测及应用[J]. 无损检测, 2002, 24(4): 139-143
- [7] 刘怀喜, 张恒, 马润香. 复合材料无损检测方法[J]. 无损检测, 2003, 25(12): 631-634
- [8] 葛邦, 杨涛, 高殿斌, 等. 复合材料无损检测技术研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(6): 67-71
- [9] 何永乐. 碳-碳复合材料的无损检测[J]. 航空工程, 2001(4): 22-23
- [10] 王俊山, 许正辉, 黄葛伟, 等. 用 CT 图象分析 C/C 复合材料的内部缺陷[J]. 宇航材料工艺, 1998, 28(6): 53-56
- [11] 金虎, 杨宝刚, 任华友, 等. 利用 CT 技术检测碳/碳复合材料的研究[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(2): 66-68
- [12] 张扬, 彭晓峰. 多孔材料内部结构的微 CT 扫描仪分析[C]//中国工程热物理学会 2004 年学术会议, 1047-1050
- [13] Luo Shouhua, Wu Jing, Zhang Bo, et al. Fitting correction method of ring artifacts for reconstructing cone-beam CT images[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics. 2010, 27: 34-38

(编辑 任涛)