

# 微焦点CT在陶瓷基复合材料上的检测应用

熊 瑛, 刘海强, 杜本莉, 王树鹏, 方建明

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

**[摘要]** 陶瓷基复合材料具有耐高温、耐腐蚀、高比强度等诸多优点,在航空航天领域的应用越来越广泛。受制备工艺和原材料等原因限制,产品会产生各种缺陷。能够进行缺陷检测的无损检测方法有超声波、CT、红外热成像、X射线等。本文基于微焦点CT系统,开展调节片类薄壁陶瓷基复合材料的检测试验。确定微焦点CT具备整体零件亚毫米级孔检测能力,且测量结果更准确。微焦点CT可以获得夹杂物、裂纹、断丝等缺陷清晰检测图像,能够实现材料孔隙率计算。

**关键词:** 陶瓷基复合材料;微焦点CT;断丝;孔隙率;纤维分布;衰减系数

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.19.058



熊 瑛

副总工程师、研究员级高级工程师,长期从事检验检测及质量控制工作。

陶瓷基复合材料是以碳化硅或氮化硅等陶瓷材料作为基体,编制上各种纤维组成的一类复合材料。其耐温性能大大提高(近 2000℃),远

超一般金属材料,而且在高温时的强度和刚度均较高。组成陶瓷基复合材料的元素多为轻元素构成,材料整体质量较小,大约仅为碳钢的 1/3,同时由于纤维的增强和增韧作用,有效提高了陶瓷材料的断裂韧性,此外,陶瓷基复合材料还具有较好的抗腐蚀能力<sup>[1-2]</sup>。上述优异的性能使陶瓷基复合材料在航空航天领域得到了长足的发展和广泛的使用,是各国争先发展的先进材料。

陶瓷基复合材料在制备过程中因为工艺的稳定性、周围环境的变化以及原材料等问题会产生一些缺陷,诸如裂纹、气孔、夹杂、分层、密度不均、束丝断裂等<sup>[3-4]</sup>。这些缺陷会降低材料的高比强、高比模、耐高温、耐磨损和耐化学腐蚀等方面的性能,因此必须选择合适的无损检测方法检测出这些缺陷,从而保证最终产品的质量<sup>[5]</sup>。陶瓷基复合材料中的缺

陷尺寸较小,一般比金属或其他种类的复合材料小 1~2 个数量级,现有的无损检测方法如电导率测量、渗透检测、X射线、中子射线、超声波、CT、红外热成像、激光超声、微波及核磁共振等<sup>[6-7]</sup>。随着微焦点射线机和纳米焦点射线机的技术成熟,微焦点CT和纳米焦点CT逐渐开始应用于实际检测,其极高的分辨率(微米级甚至更高)对于微小缺陷具备很高的检出能力。

## 陶瓷基复合材料制备工艺

### 1 制备工艺概述

陶瓷基复合材料目前的成型技术主要是化学气相渗透法(即 CVI 法)、先驱体浸渍裂解法(即 PIP 法)和熔融浸渗法(即 MI 法),其中前两种方法较为成熟。所用材料体系大部分是 C/C 和 C/SiC,近几年由于国内 SiC 纤维取得一定的突破,因此

SiC/SiC 复合材料也开始研制和应用,并逐渐形成了工程化规模<sup>[8-10]</sup>。本文计算和试验均基于 SiC/SiC 材质展开。

陶瓷基复合材料构件制备的主要工艺路线如图 1 所示, CT 可以获得制件完整的三维信息,因此把控产品质量建议将 CT 检测安排在成品零件进行,或者作为中间工序安排在致密化工艺之后。

## 2 纤维编织特点

与传统的金属和非金属材料不同,复合材料的最大特点就是“设计、工艺、材料、制造一体化”,针对产品的具体使用工况可以选择不同的编织方式。

纤维在复合材料中主要起到补强增韧的功能,必须以有结构的预制体的形式作为增强相。纤维预制体的编织,借鉴了历史悠久的纺织工艺技术与科研成果并加以发展,采用不同纺织工艺制备的纺织结构材料作为复合材料的增强结构骨架,就像建筑物中的钢结构框架一样,不仅从结构和性能上强化了复合材料,而且易于实现复合材料结构件的近净仿形成型,三维纺织结构材料是高性能复合材料的结构增强相<sup>[11-12]</sup>。其中三维编织有着整体、精确、结构合理、可设计性强等优点,保证了纤维完整性、分布状态、体积分数等决定复合材料性能的因素<sup>[13]</sup>。目前常见的纤

维编织方法如图 2 所示。了解陶瓷基复合材料的织构方式有助于分析 CT 断层扫描时的影像。

作为复合材料成型工艺过程的初始步骤,纤维预制体的设计与编织显的尤为重要。随着性能的提高, SiC 纤维的模量越来越大,编织变得越来越困难,工艺的不合理会导致断丝或无法成型等。

复合材料整体性能取决于纤维本身性能。不同的编织结构提供了不同的增强倾向,如果设计部门不能根据实际使用工况对纤维织物编织方式进行设计,也会导致材料提前失效或者使用性能不达标。

在织物上使用化学气相沉积工艺沉积界面层难以保证均匀沉积,导致了材料内外质量不均。

## CT 检测原理及可行性分析

CT (Computed Tomography) 又

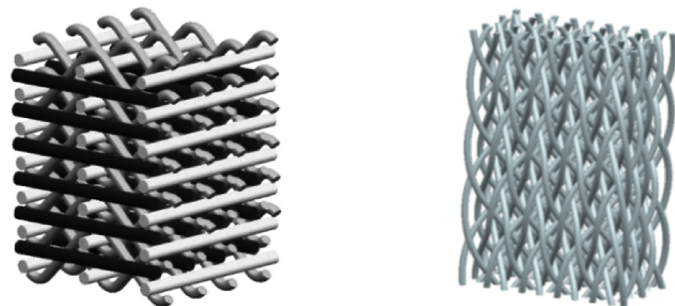
叫计算机层析成像,图 3 给出了采用面阵探测器进行锥束 CT 扫描的示意图。相比扇束 CT 扫描,锥束 CT 扫描的射线利用率高、采集效率高。因此也是尺寸较大零件首选的 CT 检测方法。

对于 CT 系统来说,通过测量不同方向上物理量的空间分布,并从这些数据中计算出非叠加图像。被测量的物理量通常为射线传播方向上衰减系数的线积分,满足:

$$p_{\theta}(s) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy \quad (1)$$

式中,  $p_{\theta}(s)$  为任意  $\theta$  角度下的物体投影值,  $f(x, y)$  为  $(x, y)$  点处的衰减系数。

只有当被检测物体的衰减系数有明显差异时才能被检测出来。物质的衰减系数满足:



(a) 2.5D 编织

(b) 3D 编织

图2 陶瓷基复合材料编织方式

Fig.2 Braided method of ceramic matrix composites

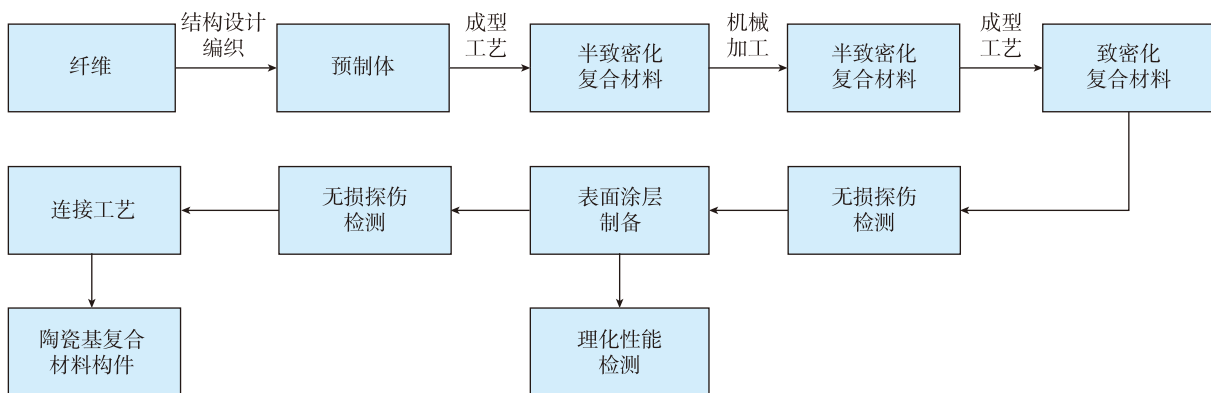


图1 陶瓷基复合材料成型工艺路线

Fig.1 Forming process of ceramic matrix composites

$$\mu = \rho * \mu_m = \rho \sum_{i=1}^n W_i \mu_{mi} \quad (2)$$

式中,  $\mu$  为线衰减系数,  $\rho$  为密度,  $W_i$  为第  $i$  种元素或组份的百分比,  $\mu_{mi}$  为第  $i$  种元素的质量衰减系数。

本文研究的复合材料基体为 SiC/SiC, 由于其他杂质元素含量非常少, 这里忽略不计。复合材料中的孔洞和孔隙基本为空气, 制备过程中的其他气体(如惰性气体)残留在内部的量非常少, 这里也予以忽略不计。参考《美国无损检测手册》(射线卷)中提供的元素衰减系数, 可以分别计算出复合材料基体和空气的线衰减系数, 见图 4 所示。

从图 4 可以看到陶瓷基复合材料基体的衰减系数要比空气大较多, 约是空气的 2~3 倍。因此 CT 扫描时应能清晰分辨基体中的孔洞。

## 试验设备及过程

### 1 微焦点 CT 检测系统

试验所用的微焦点 CT 检测系统组成如图 5 所示。主要由双射线源(小焦点射线机和微焦点射线机)、高精度转台、双探测器(面阵探测器和 LDA 线阵探测器)、计算机控制计算分析系统组成。

### 2 试验过程

为验证微焦点 CT 对陶瓷基复合材料的检测能力, 将试验过程分两个方向进行:

(1) 宏观缺陷检测, 采用复合材料模拟件或缺陷件进行, 检验整体零件缺陷分辨能力。

(2) 微观缺陷和微观结构检测, 从陶瓷基复合材料整件中截取毫米级小块, 进行高分辨率检测, 检验微小结构的分辨能力。

#### 2.1 整件宏观缺陷检测及测量

为了验证微焦点 CT 系统对陶瓷基复合材料整件检测时孔洞能力检测及测量能力, 特制作了图 6 所示的试验样件。样件的长宽高约: 350mm × 130mm × 3mm。试样中预

置了多组通孔, 孔径约 0.3~0.6mm 不等。此外还挑选个别带有夹杂物的零件进行 CT 扫描试验。

为对比常规 CT 与微焦点 CT 在检测结果上的差异, 试验分别采用小

焦点 CT、微焦点 CT 进行了两次试验对比, 过程选用的参数见表 1 所示。

#### 2.2 高分辨率微观检测

如果用零件整体进行高分辨率扫描, 一方面 CT 检测形成的数据信

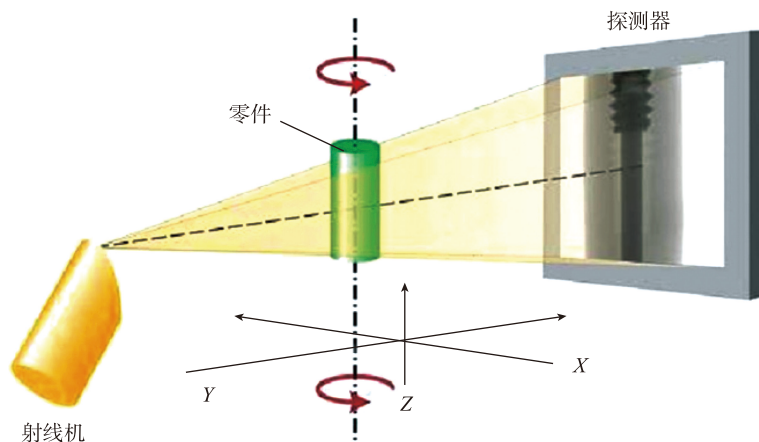


图3 锥束CT扫描示意图

Fig.3 Schematic diagram of cone beam CT scanning

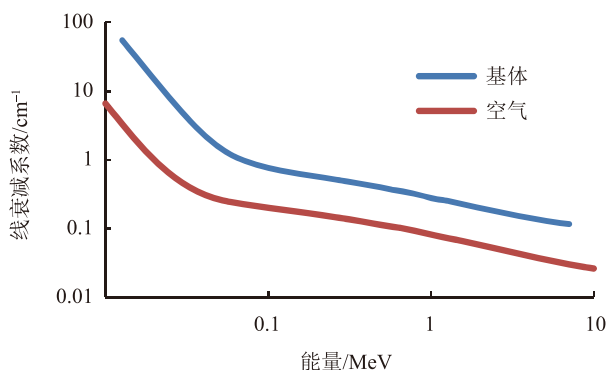


图4 复合材料基体和空气的衰减系数

Fig.4 Absorption coefficient of composite matrix and air

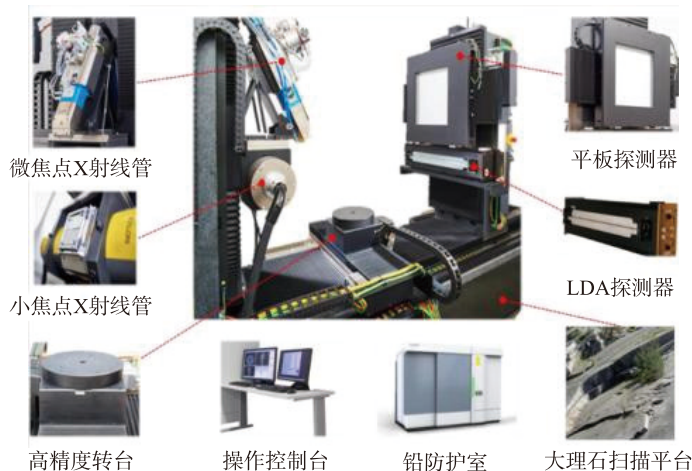


图5 微焦点CT扫描系统

Fig.5 Micro-focus CT scanning system

息过于巨大,目前计算机的计算能力还远远不够,另一方面大尺寸零件各部位的分辨率不同,离旋转中心越远,分辨率越低,在高分辨率微观检测时也会产生较大影响。

选取和测试试样同种制备工艺的陶瓷基复合材料制件中截取出约3mm×3.5mm×2mm块体,进行CT超高分辨率检测。检测参数见表2。

## 结果分析与讨论

### 1 整件检测结果与讨论

关于通孔的检测结果见图7。在图7两幅图像上均可以看到直径不一的黑色圆孔显示,这些圆孔每排3个,共5行。图像上无伪影显示,这也从侧面上证明200kV能量足够穿透陶瓷基复合材料,使用微焦点CT检测是完全可行的。总的来说常规CT和微焦点CT对这类小孔均具备检出能力,但从清晰度来说,试验2的结果更清晰一些,也就是微焦点

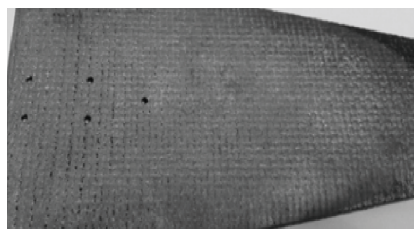


图6 试验件实物(局部)  
Fig.6 Test object (part)

表1 整件测试参数

Table 1 Test parameters for the whole part

试验名称	试验1	试验2
射线焦点	小焦点	微焦点
探测器	面阵	面阵
探测器像元数量	2048	2048
管电压/kV	220	200
电流/mA	2.00	0.3
功率/W	700	60
单次扫描时间/min	15	15
重建时间/min	5	5
放大倍数	2.90	2.97
图像尺寸	2048	2048
分辨率/ $\mu\text{m}$	135	13
滤波板	1mm Al	0.5Sn+0.5Fe

CT形成的图像要清晰明显。

将这些小孔自左至右,自上而下,按照1~15的顺序进行编号,分别进行测量,并将测量的结果与光学测量的基准值进行比较,结果见图8。从图8中可以看到,小焦点CT和微焦点CT测量的数值与基准值均存在误差,且所有结果均偏大,但微焦点CT检测结果更贴近于基准值。

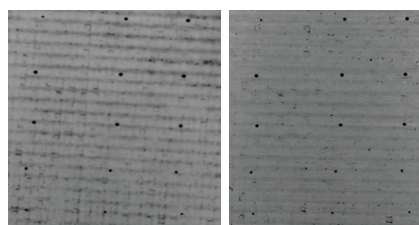
原因分析:通孔采用激光打孔工艺制作,在厚度约2mm以上时,激光会出现散焦和能量密度下降等现象,从而导致所熔蚀的孔洞不能形成直径均一的通孔,如图9所示。在不同位置选取的孔直径出入较大,必须明确规定部位才好比较。而光学测量的孔径一般是以景深方向投影测量,往往获得最小孔径尺寸。此外通孔并非完美圆形,不同径向上测量的尺寸也会有一定的浮动。这都造成最终测量结果与实际值有较大的差距。

制备过程中如果混入其他杂质,将会在陶瓷基复合材料中形成夹杂类缺陷,由于陶瓷基复合材料密度很低,所以一般夹杂物的密度相对要高很多,因此在图像上一般是白色高亮显示。图10左侧白色亮点所示即为夹杂,这类缺陷分布一般没有规律。

表2 小块体测试参数

Table 2 Test parameters for small block

样品	管电压/ kV	管电流/ $\mu\text{A}$	分辨率/ $\mu\text{m}$	曝光时间/ s
整体	80	120	6.1	0.5
局部	100	25	2.03	0.9



(a) 试验1 (b) 试验2

图7 通孔CT图像

Fig.7 Through hole CT image

### 2 小块体高分辨率检测结果分析与讨论

小块体整体扫描CT见图11。从图11上可以看到清晰的层状结构,如此小的块体三维扫描数据量已经达到了10多GB,如果是整个零件的扫描数据将达到数个TB甚至更多,以目前计算机的数据处理能力是很难实现的。因此从这个方面来说,被检测零件(或区域)的大小也限制了所能达到的检测分辨率。

裂纹形貌如图12、13白色箭头处所示,裂纹长度约0.5~2mm不等,裂纹一般一端尖细并带有树枝状分叉,走势上往往带有锯齿状不规则显示。陶瓷基复合材料中纤维-基体界面的存在能够传递载荷、偏转裂纹、分散应力和保护纤维。因此陶瓷基复合材料中产生的微裂纹往往较难连续穿过多层形成,而会在较薄弱的两层之间扩展。

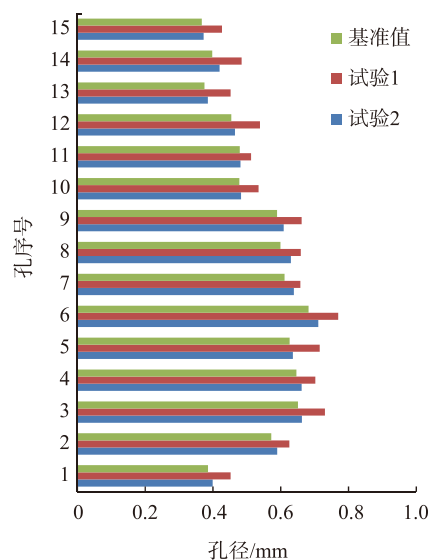


图8 两种试验结果对比

Fig.8 Comparison of two test results

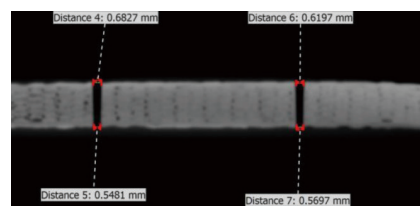


图9 通孔孔径不一致的CT切片

Fig.9 CT slice with different aperture sizes

从图 12、13 上也可以看到大量的孔洞存在,一般气孔显示边界较为圆滑。图 14 所示为局部扫描时宏观气孔和微观气孔的放大图。宏观气孔的直径约 100 $\mu\text{m}$  以上,分布在纤维束之间的间隙,微观气孔的直径约 10 $\mu\text{m}$  左右,分布规律不明显,束丝中间和界面层均有分布。

CT 的图像上还可以看到纤维束分布特征,从图 15 中可以看出宏观束丝纵横交错分布。束丝的直径约在 0.6~0.8mm 之间。通过小块体局部扫描,可以得到如图 16 所示的微观单丝形貌,单丝直径约 10 $\mu\text{m}$  左右。图 17 为单根丝断裂的形貌图,白色箭头所指为断裂处。但受分辨率的限制,尚不能得到更为清晰的影像。

受计算机计算能力限制,孔隙

率计算过程耗时特别长。图 18 为孔隙率测量计算的效果图,其中黄色代表基体材料,青色为孔隙骨架。整个块体计算得到的孔隙总体积约  $1.89 \times 10^9 \mu\text{m}^3$ ,孔隙率为 8.38%。SiC 基体的密度约 2.7,按此数值计算陶瓷基复合材料的密度  $\rho$  为:

$$\rho = \rho_{\text{空气}} \times 8.38\% + \rho_{\text{基体}} \times (1 - 8.38\%)$$

空气的密度为 1.29g/cm<sup>3</sup>, SiC 基体的密度约 2.7g/cm<sup>3</sup>,则陶瓷基复合材料计算密度为 2.47g/cm<sup>3</sup>。而实测的复合材料密度范围在 2.2~2.4 g/cm<sup>3</sup>。之所以计算密度与实测密度会有一定差距,是因为孔隙边界拟合还有欠缺,并不能如实反映实际孔隙边界,如小孔隙是几微米甚至更小直径的孔洞,本试验是发现不了的,所以造成最终孔隙率计算结果必然比实

际值要小。但作为目前唯一的测量手段,仍具备一定的参考意义。

## 结论

微焦点 CT 能够实现陶瓷基复合材料各类缺陷的检测需求,但也存在在一些不足之处,具体结论如下:

(1) 微焦点 CT 系统的穿透能力足够,能够对较大尺寸陶瓷基复合材料实施断层扫描检测。对于宏观孔洞(亚毫米级)缺陷,微焦点 CT 检测分辨率要优于常规小焦点 CT。

(2) 选取小块试样,可以采用微焦点 CT 分析亚毫米级以下的各类微观缺陷,形成的影像清晰可辨。但整体零件的精细 CT 断层扫描受计算机的存储和计算能力限制,尚不能够实现。

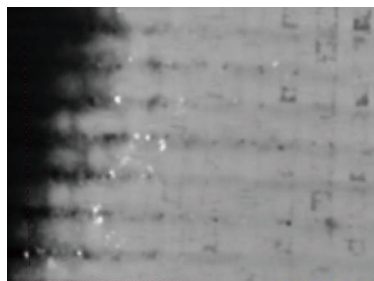


图10 夹杂物  
Fig.10 Inclusion

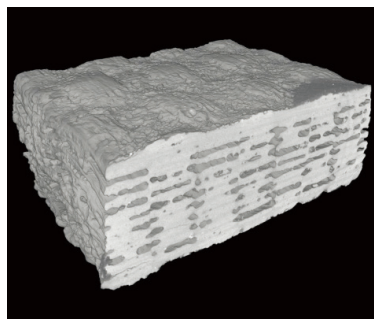


图11 小块体三维浮雕  
Fig.11 Three dimensional relief map of small block

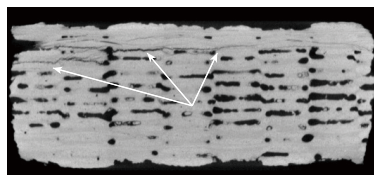


图12 XY方向裂纹  
Fig.12 XY direction crack

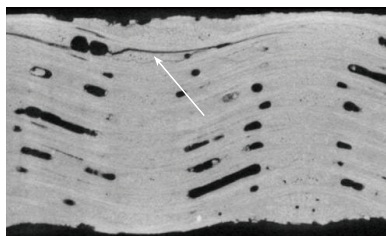


图13 YZ方向裂纹  
Fig.13 YZ direction crack

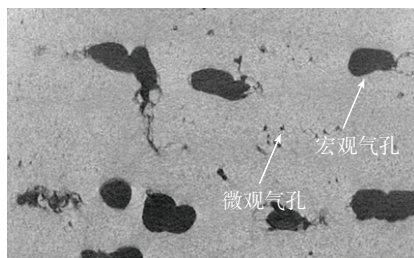


图14 宏观气孔和微观气孔  
Fig.14 Macroscopic and microscopic holes

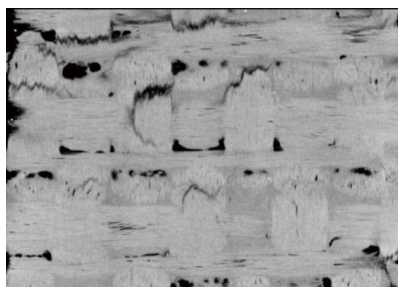


图15 宏观束丝分布  
Fig.15 Macro beam distribution

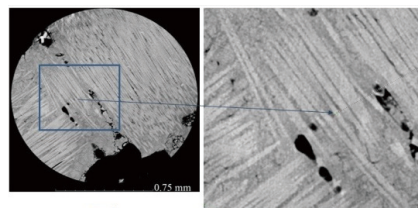


图16 微观单丝分布  
Fig.16 Micro-monofilament distribution

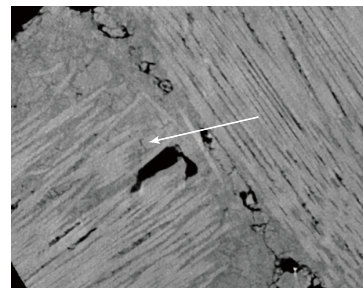


图17 单丝断裂  
Fig.17 Single wire fracture

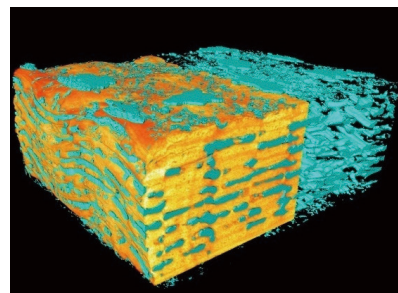


图18 孔隙拟合  
Fig.18 Micro-pore fitting

(3) 陶瓷基复合材料孔隙率可以通过微焦点 CT 进行测量,但计算机的运算能力是目前制约检测效率和计算结果准确度的主要因素。可以通过增加计算机硬件配置和多计算机联网计算的方式来改善计算瓶颈。也可以开发一种针对孔隙和基体素压缩编码算法来简化计算。

### 参考文献

- [1] 朱则刚. 复合陶瓷的应用发展是未来新材料市场的主题[J]. 现代技术陶瓷, 2012(3): 28-34.
- ZHU Zegang. The application and development of composite ceramics is the theme of the future new material market[J]. Modern Technical Ceramics, 2012(3): 28-34.
- [2] 刘玲. 先驱体转化法制备连续碳化硅纤维增强氮化硅基复合材料[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- LIU Ling. Preparation of continuous silicon carbide fiber reinforced silicon nitride matrix composites by precursor transformation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
- [3] 成来飞, 左新章, 刘永胜, 等. 自愈合 C/SiC 陶瓷基复合材料的制备工艺与性能[J]. 航空制造技术, 2014, 57(6): 24-29.
- CHENG Laifei, ZUO Xinzhang, LIU Yongsheng, et al. Preparation and properties of self-healing C/SiC ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(6): 24-29.
- [4] 邹武. 三维编织 C/SiC 复合材料的制备及其性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- ZOU Wu. Study on preparation and properties of 3D braided C/SiC composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.
- [5] 杨福树. 2.5 维编织陶瓷基复合材料疲劳行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- YANG Fushu. Fatigue behavior of 2.5 dimensional braided ceramic matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012.
- [6] 梅辉, 张鼎, 夏俊超, 等. 浅谈陶瓷基复合材料无损检测方法及其进展[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 24-30.
- MEI Hui, ZHANG Ding, XIA Junchao, et al. Nondestructive testing methods for ceramic matrix composites and their progress[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 24-30.
- [7] 陆铭慧, 朱颖. 无损检测新的机遇与挑战: 连续纤维增韧陶瓷基复合材料[J]. 航空制造技术, 2013, 56(4): 48-51.
- LU Minghui, ZHU Ying. New opportunities and challenges for NDT: continuous fiber toughened ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(4): 48-51.
- [8] LI L. Advanced SiC/SiC composite systems[J]. Comprehensive Composite Materials II, 2018, 5: 41-85.
- [9] PORWAL H, SAGGAR R. Ceramic matrix nanocomposites[J]. Comprehensive Composite Materials II, 2018:138-161.
- [10] 周帆, 曹英斌, 刘荣军, 等. C/C-SiC 复合材料高温防护研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(15): 68-74.
- ZHOU Fan, CAO Yingbin, LIU Rongjun, et al. Advances in high temperature protection of C/C-SiC composites[J]. Materials Review, 2016, 30(15): 68-74.
- [11] 闫联生, 李贺军, 崔红, 等. 连续纤维补强增韧碳化硅陶瓷复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(1): 60-63.
- YAN Liansheng, LI Hejun, CUI Hong, et al. Research progress of continuous fiber reinforced and toughened silicon carbide matrix ceramic composites[J]. Materials Review, 2005, 19(1): 60-63.
- [12] 李喜宝, 柯昌明, 李楠. SiC 晶须增韧陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(5): 394-397.
- LI Xibao, KE Changming, LI Nan. SiC research progress in whisker toughened ceramic matrix composites[J]. Materials Review, 2007, 21(5): 394-397.
- [13] PLUVINAGE P, PARVIZI-MAJIDI A, CHOU T W. Damage characterization of two-dimensional woven and three-dimensional braided SiC-SiC composites[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(1): 232-241.

通讯作者: 刘海强, 硕士、高工, 研究方向为无损检测, E-mail: 284857249@qq.com.

## Application of Micro-Focus CT on Inspection of Ceramic Matrix Composites

XIONG Ying, LIU Haiqiang, DU Benli, WANG Shupeng, FANG Jianming

(AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**[ABSTRACT]** Ceramic matrix composite is increasingly wide used because of many advantages such as high temperature resistance, corrosion resistance and high specific strength. However, various defects can be created in the production because of the limitation of raw material and manufacturing process, and those defects can be detected by ultrasonic inspection, CT, infrared thermal imaging, X-ray inspection and so on. Based on the micro-focus CT system, this article investigates the testing method of adjustment sheet parts made of ceramic based composite. It is verified that micro-focus CT system is capable of detecting sub-millimeter holes in the production, and the result of measurement is accuracy. Besides, the micro-focus CT can obtain clear images of defects such as inclusion, crack and wire break-off. Furthermore, this CT system can achieve the calculation of porosity rate in the material.

**Keywords:** Ceramic matrix composite; Micro-focus CT; Broken fiber; Voidage; Fiber distribution; Absorption coefficient

(责编 铃兰)