

# 2A50 锻铝三点弯曲试验与高分辨率 CT 成像分析

Three-point Bending Test of 2A50 Forging Aluminum and Analysis by High-resolution Computed Tomography

敖 波, 邓翠贞, 邬冠华

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

A O Bo, DENG Cui zhen, WU Guan hua

(Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education),

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**摘要:** 采用高频疲劳试验机对 2A50 锻铝缺口试样进行了三点弯曲试验, 获得了含裂纹的 CT 检测试样。对疲劳试样进行了高分辨率 CT 三维重建, 分析了裂纹 CT 图像的损伤特点; 引入了参考平面, 将不同层的裂纹 CT 图像映射到参考平面定义了截面损伤危险度因子。CT 分析结果表明: 裂纹扩展过程中不同部位的疲劳损伤不均匀, 三维可视化结果直观显示了裂纹的三维形态; 截面损伤危险度因子约为 0.34, 缺陷面积为最严重损伤截面面积的 2.1 倍, 截面损伤危险度因子与疲劳周次呈单调递增关系, 可用于度量工件的损伤状态。

**关键词:** 疲劳裂纹; 三点弯曲试验; 高分辨率 CT; 可视化; 危险度因子

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)05-0013-04

**Abstract:** Three-point bending test of notched specimens of 2A50 forging aluminum was carried out by high frequency fatigue tester, specimens of computed tomography (CT) which contain fatigue crack were obtained. Fatigue specimen was reconstructed by high-resolution CT, CT images of crack were analysed; a reference plane was introduced, crack was projected on the reference plane in all CT images, and a damage risk factor was proposed. Results show that the damage of fatigue is uneven in different regions, the three-dimensional (3D) morphology of crack is visualized; the value of damage risk factor is 0.34, the defect area is 2.1 times the size of the most serious damage cross section, the damage risk factor is synchronized varying according to the fatigue cycles, it can be used to characterize damage of fatigue.

**Key words:** fatigue crack; three point bending test; high-resolution CT; visualization; risk factor

材料疲劳破坏的本质是疲劳裂纹的萌生、稳定扩展和失稳断裂。近几年来, 国内外航空领域发生多起因疲劳裂纹未能及时发现造成的重大空难事故, 航空构件中疲劳裂纹的检测与分析一直是重要的研究领域<sup>[1,2]</sup>。虽然国内外对航空材料疲劳裂纹萌生、稳定扩展、失稳断裂过程进行了大量、深入的研究<sup>[3-6]</sup>, 取得了大量研究成果, 由于裂纹扩展研究复杂性高, 难以对裂纹扩展做出准确的预测。现有的无损检测手段中除 CT 外其他检测手段无法同时准确获取三维裂纹的位置、尺寸、分布等信息, 而表面裂纹(二维)无法全面反映内部裂纹(三维)。因此, 探索裂纹扩展的三维分析理论对裂纹扩展预测具有重要的指导意义。

高分辨率 CT<sup>[7]</sup> 具有极好的空间分辨率, 可以无损获取工件的高分辨率三维图像, 能清晰、准确、直观

地显示工件内部详尽的三维信息。随着高分辨率 CT 的发展, 国外如德国菲尼克斯公司率先推出了纳米焦点锥束工业 CT(简称纳米 CT)系统, 其细节分辨能力可达到 0.2~0.3  $\mu\text{m}$ 。国内主要有中国科学院高能物理研究所、中国工程物理研究院应用电子学研究所、清华大学、中国科学技术大学同步辐射材料力学实验站等单位有研制高分辨率 CT 设备的能力, 空间分辨率可达 5  $\mu\text{m}$ 。

随着高分辨率 CT 设备在疲劳研究中的应用, 国外在疲劳裂纹的高分辨率 CT 成像研究上进行了大量试验研究。典型代表有 Khor<sup>[8]</sup> 等利用三维可视化直观显示了裂纹, 并揭示了裂纹是以体的形式存在, Buffière<sup>[9]</sup> 等对疲劳短裂纹成核和短裂纹萌生阶段进行了高分辨率三维成像研究, Qian<sup>[10]</sup> 等对疲劳裂纹扩

展进行可视化跟踪和分析, Ohgaki 等<sup>[11]</sup> 利用欧洲同步辐射实验室的 Beamline ID19 研究了微观组织结构对裂纹扩展的影响, 通过液态镓渗入方法直观显示出材料微观组织结构。研究文献资料显示国外通过 CT 成像方法已开展对内部裂纹的统计量化分析, 估算与材料力学性能相关的参数, 如三维应变<sup>[12]</sup>、应力强度因子<sup>[13]</sup>、局部裂纹扩展驱动力分析<sup>[14, 15]</sup>等。由于裂纹在不同扩展阶段的尺度变化大, 重庆大学<sup>[16]</sup> 将裂纹的萌生、扩展过程划分为显微尺度细观裂纹、CT 尺度裂纹和宏观裂纹 3 个阶段, 为 CT 设备所研究的裂纹尺度给出了较科学的划分。高分辨率 CT 的应用将有助于推动裂纹三维分析理论的发展。本工作进行了 2A50 锻铝缺口试样三点弯曲试验、高分辨率 CT 三维重建和裂纹形态的三维可视化, 分析了裂纹 CT 图像的损伤特点, 结合图像特征分析, 研究了新的损伤表征参量。

## 1 CT 重建的物理原理

若输入 X 光子是单能的, 在均匀材料中, 入射和透射 X 射线强度服从射线衰减的基本规律:

$$I = I_0 e^{-\mu \Delta x} \quad (1)$$

式中:  $I$  是透射 X 射线强度;  $I_0$  是入射 X 射线强度;  $\Delta x$  是厚度 (cm);  $\mu$  是材料的线性衰减系数 ( $\text{cm}^{-1}$ ), 随着 X 射线能量改变, 且因所选材料而异)。

若被穿透物质是非均匀材料, 由式 (1) 推广得到

$$p = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \int_L \mu(x, y) dL \quad (2)$$

式中:  $p$  为投影测量值;  $\mu(x, y)$  为被穿透物质沿射线路径  $L$  的线性衰减系数的分布函数。  $\mu$  可近似表示为

$$\mu \approx \rho K Z^3 \lambda^3 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  是被穿透物质的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $Z$  是被穿透物质的原子序数;  $\lambda$  是入射射线的波长;  $K$  为系数。

式 (3) 表明: 当射线能量一定时, 被穿透物质的密度越大, 原子序数越高, 则重建出的线性衰减系数越大, 对应到 CT 图像 (8 位) 中, 该像素点灰度值越大。当裂纹出现时, 物质的密度和原子序数减小, 重建出的线性衰减系数小, 对应 CT 图像中灰度值小, 由此可以检测出裂纹。因此 CT 重建问题可以表述为: 给定一个物体被测量的线积分 (实际是多个不同角度下的投影测量, 通过探测器实现), 如何估计或计算它的线性衰减系数分布。

## 2 2A50 锻铝板材三点弯曲疲劳试验

采用三点弯曲疲劳试验, 试验机型为 QBG-100 高

频疲劳试验机, 试验材料为 2A50 锻铝板材。三点弯曲试样设计参考《GB/T 232—1999 金属材料弯曲试验方法》, 同时采用线切割预制缺口, 试样尺寸为  $120\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 预制缺口尺寸为  $1\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 三点弯曲疲劳试样模型如图 1 所示。

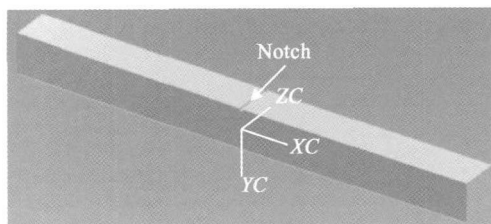


图 1 三点弯曲疲劳试样模型

Fig. 1 Model of fatigue specimen for three point bending test

试验在室温环境下进行, 静载荷为  $-1.0\text{kN}$ , 动载荷为  $0.8\text{kN}$ , 试验频率  $f = 74.5\text{Hz}$ 。图 2 为三点弯曲疲劳试验图。试验过程中当观测到试验频率平稳下降时立即停机, 此时循环周次为 17300 次, 试样中已出现裂纹。

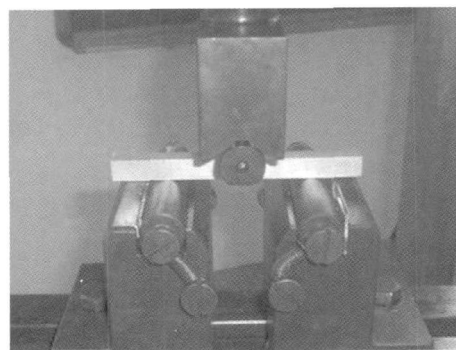


图 2 三点弯曲疲劳试验

Fig. 2 Three point bending fatigue test

## 3 高分辨率 CT 三维重建

对三点弯曲试验后的试样进行了微焦点 CT 扫描试验 (微焦点 CT 扫描设备采用 YXLON FEINFOCUS Cougar SMT X-Ray 检测系统, 设备来源于中国工程物理研究院应用电子学研究所, 焦点为  $400\mu\text{m}$ ), 其中微焦点 CT 扫描时管电压为  $100\text{kV}$ , 管电流为  $29.6\mu\text{A}$ 。CT 扫描时投影图像为 400 幅, 重建矩阵大小为  $512 \times 512$ , 重建方向为沿 XC 轴向。由于裂纹体厚度较小, 在缺口附近重建了 40 层 CT 图像, 经过图像预处理后, 图 3 为试样第 14 层、第 18 层和第 23 层的重建图像, 经过裂纹提取后计算分析第 18 层 CT 图

像为最严重损伤截面。从图 3 可以看出, 裂纹体在不同层位置的扩展存在较大差别。由于 CT 具有层析成

像的功能, 可以从 3 个方向对断层图像进行分析, 本工作只是沿  $XC$  轴向进行了分析。

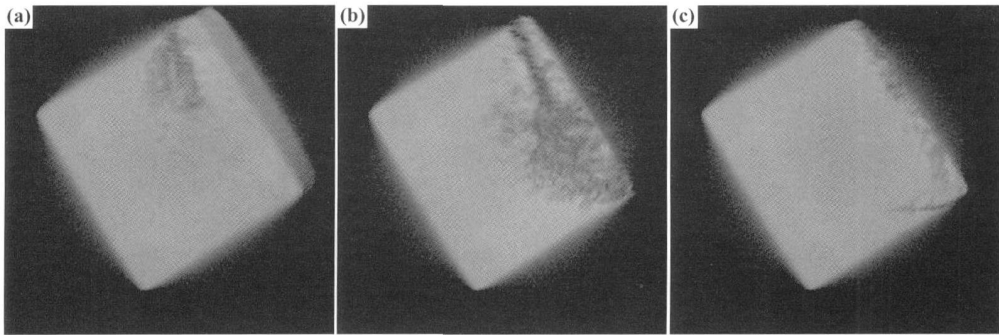


图 3 不同层位置的裂纹 CT 图像( $XC$  轴向)  
(a) 第 14 层; (b) 第 18 层; (c) 第 23 层

Fig. 3 CT images at the different cross section along  $XC$  axis  
(a) slice 14; (b) slice 18; (c) slice 23

4 裂纹形态三维可视化

利用 VGStudio MAX 三维可视化软件, 对上述 40 层 CT 图像进行三维可视化, 可视化模型如图 4(a) 所示。

结合图像处理中阈值、三维区域生长、特征逻辑操作等运算, 实现了可视化模型中裂纹部分的提取, 图 4(b) 为裂纹特征提取后三维可视化结果(黑色背景区域没有全部显示), 其中裂纹是以薄层体显示。三维可视化结果直观显示了裂纹的形态。

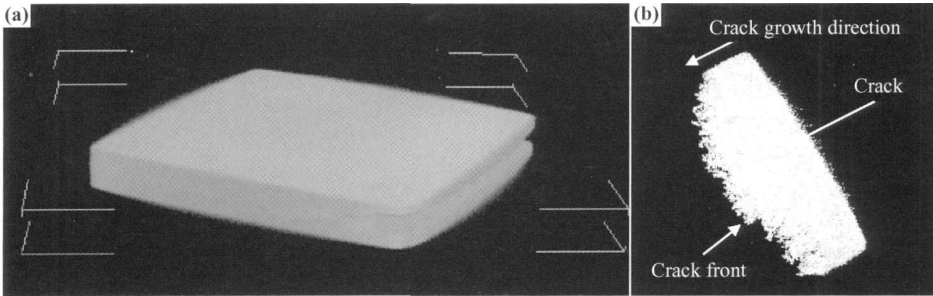


图 4 三维可视化 (a) 三维可视化模型; (b) 裂纹体(黄颜色)

Fig. 4 3D visualization (a) model of 3D visualization; (b) crack(yellow)

5 截面损伤面积分析

由于不同层的裂纹扩展速率不同, 导致不同层位置的损伤不同, 这种损伤可用损伤面积来度量, 早期的损伤面积参量主要采用最严重损伤截面面积。为了考虑整体损伤, 沿  $YCZC$  平面定义一个参考平面, 结合疲劳试样的对称性, 参考平面有效区域为无裂纹时 CT 图像的检测区域(或见图 5 中方形区域)。对裂纹三维提取结果(对应 40 幅裂纹提取后的图像), 每幅图像中的裂纹投影到参考平面, 得到图 5 所示的投影结果。由此可以定义截面损伤危险度因子  $\omega$

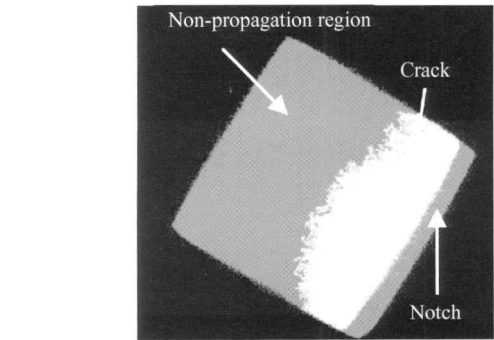


图 5 裂纹体投影到参考平面

Fig. 5 Projection of crack volume onto the reference plane

$$\omega = \frac{S'}{S} \tag{4}$$

式中:  $S'$  为裂纹体投影到参考平面后的面积(单位: 像

素);  $S$  为参考平面有效区域的面积(单位: 像素)。对本例,  $S' = 36954$ ,  $S = 108149$ , 根据式(4)计算得

$$\omega = S'/S \approx 0.34 \quad (5)$$

采用最严重损伤截面计算损伤率得到

$$\text{损伤率} = S''/S \approx 0.16 \quad (6)$$

式中:  $S''$  为最严重损伤截面面积(单位: 像素), 本例中  $S'' = 17214$ , 即本工作采用的缺陷面积约为最严重损伤截面面积的 2.1 倍。

由于  $S' \leq S$ , 因此截面损伤危险度因子  $\omega \leq 1$ , 且裂纹扩展后一阶段包括前一阶段的裂纹, 因此, 截面损伤危险度因子与疲劳周次呈单调递增关系。早期的研究成果中关于短裂纹密度是疲劳损伤的一个良好度量参量还存在一些争议, 争议的焦点在于短裂纹密度不一定具有恒增加的现象。疲劳周次越多, 截面损伤危险度因子越大, 裂纹扩展越大, 工件越接近失效。由于投影后的面积包括最严重损伤截面的投影在内, 这种投影后的截面损伤分析比以最严重损伤截面分析方法更偏向于安全。

由于重建结果受到 CT 系统极限空间分辨率的影响, 裂纹扩展尖端处尺寸低于极限空间分辨率的部分无法精确提取。

## 6 结论

(1) 通过 2A50 锻铝三点弯曲疲劳试验, 得到了含裂纹的 CT 检测样本, 进行了高分辨率 CT 三维重建。

(2) 采用可视化的方法进行了裂纹三维可视化。

(3) 引入了参考平面, 采用投影方法给出了截面损伤危险度因子的定义, 计算得到截面损伤危险度因子约为 0.34, 而采用最严重损伤截面方法计算损伤率为 0.16, 本工作采用的缺陷面积约为最严重损伤截面面积的 2.1 倍, 可以采用截面损伤危险度因子来度量工件的损伤状态。

### 参考文献

- [1] LI P, LEE P D, MAIJER D M, et al. Quantification of the interaction within defect populations on fatigue behavior in an aluminum alloy[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(12): 3539–3548.
- [2] ZHANG H, TODA H, QU P C, et al. Three dimensional fatigue crack growth behavior in an aluminum alloy investigated with in situ high resolution synchrotron X-ray microtomography[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(11): 3287–3300.
- [3] MOLENT L, JONES R, BARTER S, et al. Recent developments in fatigue crack growth assessment[J]. *International Jour-*

*nal of Fatigue*, 2006, 28(12): 1759–1768.

- [4] SIEGL J, NEDBAL I, KUNZ J. Fatigue crack growth history in damage tolerance design of aircraft structures[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(6): 1062–1067.
- [5] 刘新灵, 张卫方, 陶春虎. 疲劳损伤定量分析与失效评估研究进展[J]. *失效分析与预防*, 2006, 1(1): 35–39.
- [6] 王红, 左华付, 何训, 等. 某航空发动机第三级涡轮叶片失效分析[J]. *失效分析与预防*, 2007, 2(1): 24–28.
- [7] 张朝宗. *工业 CT 技术与原理*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] KHOR K H, BUFFIÈRE J Y, LUDWIG W, et al. High resolution X-ray tomography of micromechanisms of fatigue crack closure[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(1): 47–50.
- [9] FERRIÉ E, BUFFIÈRE J Y, LUDWIG W. 3D characterisation of the nucleation of a short fatigue crack at a pore in a cast Al alloy using high resolution synchrotron microtomography[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(10–12): 1215–1220.
- [10] QIAN L, TODA H, UESUGI K, et al. Three dimensional visualization of ductile fracture in an Al-Si alloy by high resolution synchrotron X-ray microtomography[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 483–484(15): 293–296.
- [11] OHGAKI T, TODA H, SINCLAIR I, et al. Quantitative assessment of liquid Ga penetration into an aluminium alloy by high resolution X-ray tomography[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 427(1–2): 1–6.
- [12] GERMANEAU A, DOUMALIN P, DUPRÉ J C. Comparison between X-ray micro computed tomography and optical scanning tomography for full 3D strain measurement by digital volume correlation[J]. *NDT & E International*, 2008, 41(6): 407–415.
- [13] LIMODIN N, RÉTHORÉ J, BUFFIÈRE J Y, et al. Crack closure and stress intensity factor measurements in nodular graphite cast iron using three dimensional correlation of laboratory X-ray microtomography images[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(14): 4090–4101.
- [14] TODA H, YAMAMOTO S, KOBAYASHI M, et al. Direct measurement procedure for three dimensional local crack driving force using synchrotron X-ray microtomography[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(20): 6027–6039.
- [15] QU P, TODA H, ZHANG H, et al. Local crack driving force analysis of a fatigue crack by a microstructural tracking method[J]. *Scripta Materialia*, 2009, 61(5): 489–492.
- [16] 段黎明, 周渝庆. 基于工业 CT 图像的材料疲劳寿命预测[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(8): 831–835.

基金项目: 航空科学基金资助项目(20090756001)

收稿日期: 2010-11-10; 修订日期: 2011-03-15

作者简介: 敖波(1979–), 男, 博士, 讲师, 从事工业 CT 在材料疲劳应用方面研究工作, 联系地址: 江西省南昌市丰和南大道 696 号南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室(330063), E-mail: aobo0328@163.com