

密度场图像演化分析

敖波 张定华 赵歆波 徐夏刚

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要 短裂纹活动引起的密度场图像演化分析是应用工业CT研究疲劳损伤中的热点。在仿真环境下,应用亚体素模型和局部离散化完成了短裂纹群建模,实现了非均匀密度场的建模。通过高、低两种不同分辨率CT分别观看细节特征和宏观行为,初步开展了短裂纹活动效应的2维、3维信号分析。引入了图像隶属度,提出了针对裂纹细节变化的模糊增强算法,增强了密度场演化的3维分析信号,有助于监测短裂纹群活动效应。

关键词 亚体素模型 密度场 减影图像 隶属度

中图分类号: TP391.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)09-1642-05

Image Evolutionary Analysis of Density Field

AO Bo, ZHANG Ding-hua, ZHAO Xin-bo, XU Xia-gang

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract Image evolutionary analysis of density field induced by propagation of short cracks is a most discussed topic in the research of the damage caused by fatigue using ICT(industrial computed tomography). During simulation, short cracks are modeled by using a subvoxel model and local discretization, and modeling of uneven density field is fulfilled. Detailed characteristics can be detected by high resolution CT(computed tomography). Macro behaviors can be detected by low resolution CT. Two dimensional and three dimensional signal analysis of activity effect of short cracks are conducted. Membership degrees are introduced, and enhancement algorithm is proposed based on fuzzy sets. Three dimensional signals detected are enhanced in this way, which will help to monitor the activity effect of short cracks.

Keywords subvoxel model, density field, subtraction image, membership degree

1 引言

疲劳破坏是工程构件中一种常见的破坏形式,疲劳破坏的本质是疲劳短裂纹的萌生与扩展,疲劳短裂纹的萌生和扩展阶段在整个疲劳寿命中所占的比例高达80%~90%^[1]。因此,关于短裂纹的萌生和扩展研究具有重要意义。

工业CT是国际上公认的最佳无损检测手段^[2],能对构件在服役或加载试验条件下高应力区域的短裂纹发展过程和程度进行无损的可视化监测,并能对短裂纹缺陷进行定量、定性分析。现代工程应用中越来越要求能对构件进行服役过程中的

“健康状态监测”,工业CT有可能是一种新的选择。

美国华盛顿州立大学研究了X-CT在焊接缺陷检测中的应用,检测焊接处的CT图像,并认为灰度图像上的突变是由更小裂纹引起的。法国国立理工大学疲劳断裂实验室(CNAM)用X射线工业CT技术检测橡胶产品的短裂纹发展,达到了高准确率、高可靠性的目的,与普通射线检测方法相比,CT检测效果独特,是最好的实验手段。这一结果进一步揭示了高应力区的短裂纹群的发展所引起相应区域的局部密度变化可通过CT成像方法检测出来^[3]。文献^[4]首次提出了局域质量密度的概念,在2维和3维空间上分别将当前点的质量密度表示为局部区域内各点的质量密度的加权,并得到了各个像素位置

基金项目:国家自然科学基金项目(50375126)

收稿日期:2006-04-10;改回日期:2006-06-02

第一作者简介:敖波(1979~),男,西北工业大学航空宇航制造工程专业博士研究生。2004年于西北工业大学获计算数学硕士学位。主要从事工业CT理论与应用的研究。E-mail: aobo0328@mail.nwpu.edu.cn

的1维质量密度表示图。Ned^[5]将一个模型表示成多个体素的组合,在体素空间模拟了生长系统,实现了体的生长。刘欣瑜^[6]在细分体素的基础上引入了亚体素来模拟短裂纹,但仅限于1个体素内的模拟。

本文利用工业CT和疲劳裂纹研究方面的最新成果,采用亚体素模型表示短裂纹,通过构建不同阶段的非均匀密度场,展开了密度场图像的演化分析,试图揭示短裂纹与密度场图像之间的关系。短裂纹与密度场图像之间的这种关系有可能为服役构件的“健康状态监测”提供一种可行的解决方法。

2 仿真环境设计

考虑到短裂纹的尺寸小(几十个微米)及真实CT扫描装置的分辨率不够高(本实验室CT装置的空间分辨率为0.127mm),为了使仿真实验与真实CT扫描实验统一起来,需重新设置仿真环境。仿真环境设计如下:

- (1) 建模空间: $[-1, 1] \times [-1, 1] \times [-1, 1]$
- (2) 图像矩阵大小: 64×64
- (3) 像素大小(亚体素尺寸): 0.032mm
- (4) 射线源与控制台之间的距离: 20.0mm
- (5) 控制台与探测器之间的距离: 0.0mm

由于短裂纹的尺寸小及短裂纹群活动具有群体效应,采取同时在探测器位置采用高、低两种分辨率CT,低分辨率CT是建立在高分辨率基础之上的。高分辨率CT用以观看细节特征(对应图像大小为 64×64 ,像素尺寸为0.032mm),低分辨率CT用以检测短裂纹群活动引起的宏观行为(对应图像大小为 16×16 ,像素尺寸为0.128mm)。整个仿真设计如图1所示,正常分辨率CT中的1个像素对应高分

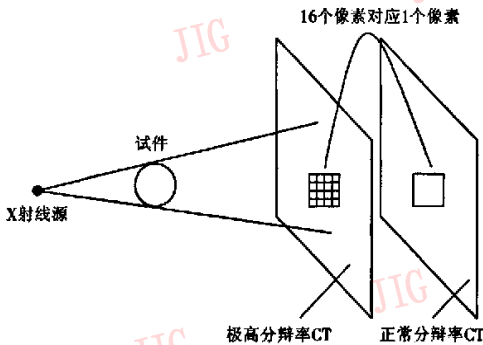


图1 仿真设计示意图
Fig.1 Schematic diagram of simulation

分辨率CT中的16个像素。

3 非均匀密度场建模

首先介绍 dos 版 Ctsimu (computed tomography simulation system) 仿真系统和 CBVCT (cone beam volume computed tomography) 仿真系统(实验室自研软件), Ctsimu 仿真系统为本实验提供的功能有 CSG (constructive solid geometry) 建模和产生投影图像, CBVCT 仿真系统为本实验过程中的投影文件滤波、重建。CSG 建模即基本体素建模,由于短裂纹不适宜用体素模型表示,需引入亚体素模型。亚体素模型是指体素模型中的体素立方体再次细分为若干更小的立方体,使细分后的小立方体的尺寸达到可以近似模拟短裂纹的程度。将这些细分体素立方体后得到的小立方体称为亚体素,将由亚体素所构成的模型称为亚体素模型。

由于亚体素模型表示物体时无疑需要更大的内存,为了使计算机能正常工作,采用局部表示方法来描述短裂纹,即只将短裂纹离散成多个亚体素的组合,将短裂纹萌生看成是空体素填充。

仿真系统中的 CSG 建模是通过 ptm 文件来实现的,可用于 CSG 建模的基本体素有圆柱、椭球体和长方体,本文只用到圆柱 (CYL, 表示服役试件,属性为钛材质) 和长方体 (BOX, 亚体素, 单个亚体素尺寸为 0.032mm, 属性为空气) 两种基本体素,初始的 ptm 文件格式如图 2 所示。

```

--- Beginning of phantom window (Xmin,Ymin,Zmin,Xmax,Ymax,Zmax).
UOL 0 -1.000 -1.000 -1.000 1.000 1.000 1.000
--- Beginning of properties (pid matID Background Hu Density pName).
EP01 1 0 0.000 0.001205 air
EP02 2 1 5.507 4.54 titanium
EP03 1 2 0.000 0.00125 air
--- Beginning of elements (eid pldx a b c y z beta gaaa).
CYL 1 2 0.5000 0.5000 0.5000
0.0000 0.0000 0.0000 0.000 0.000
BOX 2 3 0.0160 0.0160 0.0160
-0.1700 0.0403 0.0000 0.000 0.000
--- End of file.
ENDF

```

图2 初始 ptm 文件示意图
Fig.2 Schematic diagram of initialized ptm file

从图2不难看出 ptm 文件需要人工编辑,初始 ptm 文件中只有两个元素,其中第2个元素即 BOX 只是作为一个初始起裂点,沿起裂点扩展出的基本体素组合就能近似表示若干条短裂纹。当基本体素数量大时,人力是难以胜任的,这就需要扩展该软件

的 ptm 文件建模功能。为此,首先提出如下的短裂纹模拟算法。

(1) 给定初始起裂点;

(2) 采用随机扩展方法(采用随机模拟方法的目的是加快短裂纹活动的群体效应)在 26-邻接亚体素中随机选取一个亚体素(可以根据需要设置为沿与拉应力垂直的方向扩展)作为下一个起裂点,并做好跟踪记录,直到满足给定生长步数。

(3) 给定多个起裂点就能模拟出多条裂纹。

利用文件操作功能,将短裂纹模拟结果用来修改 ptm 文件,从而完成亚体素级的短裂纹群建模,最终实现非均匀密度场建模。

4 密度场演化过程分析

建模后产生投影文件,在投影文件的基础上,通过 CBVCT 仿真系统滤波、重建,得到序列切片图像,切片图像大小为 64×64 ,像素大小为 0.032mm ,即高分辨率图像。图 3 是不同阶段的非均匀密度场建模后重建出的高分辨率图像。

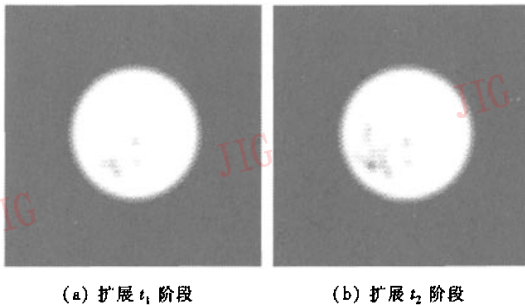


图 3 同一位置不同阶段的高分辨率图像

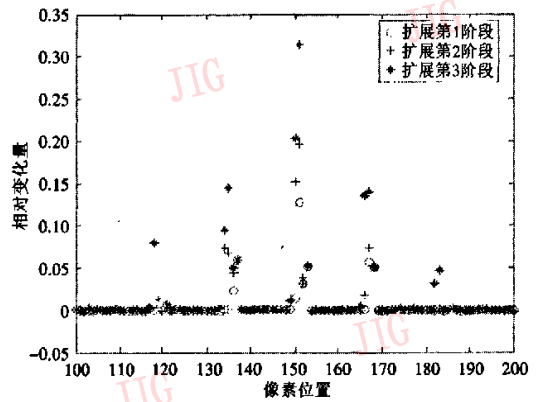
Fig. 3 High resolution CT images of same position in different phases

将这种高分辨率图像转化为低分辨率图像,2 维转化方法为 16 个像素(单切片中 4×4 网格像素)捆绑为 1 个像素,捆绑方式为均值化处理。3 维转化方法为将 64 个像素(相邻 4 个切片中 $4 \times 4 \times 4$ 网格像素)捆绑为 1 个像素,捆绑方式为均值化处理。

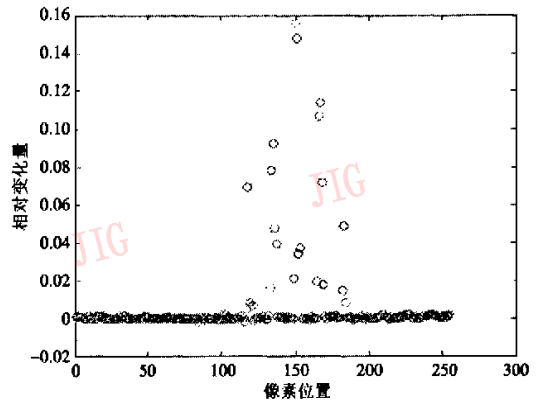
4.1 切片分析

为了考察短裂纹的扩展情况,按上述合并方法建立无任何短裂纹时的重建切片作为参考,将有裂纹时的重建切片与无裂纹时的参考切片做差值,这种图像之间的差值运算定义为减影(相应地减影结

果称为减影图像),减影图像大小为 16×16 ,像素尺寸为 0.128mm 。将减影图像结果用 1 维图形表示可间接反映出短裂纹的活动,图 4(a)为第 34 个切片位置部分像素 3 个演化阶段对应的 1 维图形表示。从图中可以看出,随着短裂纹的增多,必将引起某些像素值的突变。图 4(b)为第 32、33、34 和 35 个重建切片采用 $4 \times 4 \times 4$ 捆绑的结果与相应位置的参考切片处理结果的减影结果 1 维显示。从图 4 可以看出,短裂纹活动的群体效应这种宏观表现为是可以检测出来的,某些位置像素值的变化从侧面反映出该处新短裂纹的萌生。



(a) 第 34 个切片位置的减影结果 1 维表示



(b) 部分区域的相对变化量 1 维表示

图 4 2 维和 3 维减影分析

Fig. 4 Two dimensional and three dimensional analysis of subtraction image

4.2 空间分析模糊增强处理

在检测某阶段 3 维减影的相对变化量时,总是希望有用的目标信号越大越好。为了增强检测信号,同时抑制无用信号,在此提出模糊增强处理的方法。

先引入隶属度,记 $M \times N$ 维图像 X , 图像 X 中第 (m, n) 个像素处的灰度值为 x_{mn} , 其中 $m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$ 。按照模糊子集的概念, 则可记第 (m, n) 个模糊单点集的隶属度函数为 p_{mn} , 或图像第 (m, n) 个像素具有某种特征的程度为 $p_{mn} (0 \leq p_{mn} \leq 1)$ 。

针对本文中的减影图像(数据类型为 float 型), 若令 x_{mn} 表示 img 格式图像第 (m, n) 个像素处的灰度值, x_{max} 表示由于裂纹的演化, 空亚体素的数目变化引起的理论上的最大变化量均值, x_{max} 与具体材料的线衰减系数有关, 在实验时可取材料在某能量下的线性衰减系数均值, 这是已知的。显而易见, 一个像素具有短裂纹特征的程度可由 x_{mn} 的值反映, 且图像隶属度函数应具有下面两条特性:

(1) 当 $x_{mn} \rightarrow 0.000\ 000$ 时, 即在短裂纹演化过程中, 该像素点的灰度值前后几乎无变化, 在该处近乎无新短裂纹产生, 此时 x_{mn} 具有短裂纹特征的程度为 0。

(2) $x_{mn} \rightarrow x_{max}$ 时, 即随着短裂纹的演化, 该像素(实际上是一体素)所包含的亚体素越来越多的被空气填充, 在该处几乎都被短裂纹占据, 此时 x_{mn} 具有短裂纹特征的程度为 1。

考虑到噪声的影响, 增加第 3 条特性:

(3) 当 $x_{mn} \leq 0.000\ 000$ 时, 定义此时的隶属度为 0; 当 $x_{mn} \geq x_{max}$ 时, 定义此时的隶属度为 1。

满足上述 3 条特性的一般性隶属度函数为

$$p_{mn} = \mu_X(x_{mn}) = \begin{cases} 0 & x_{mn} \leq 0.000\ 000 \\ \frac{x_{mn}^c}{x_{max}^c} & 0.000\ 000 < x_{mn} < x_{max} \\ 1 & x_{mn} \geq x_{max} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$, 参数 c 是与像素合并方式有关, 与材质无关的常数。

参数 c 通过如下方式计算得到: 由于 CT 设备密度分辨率达到 1% 就能分辨出细节特征, 采用 64 像素合并时, 根据计算, 只要有 1 个像素改变为另一种属性就能产生 1% 的对比度。因此将 1 个像素属性改变时的隶属度设置为 0.5, 有

$$\left(\frac{1}{64}\right)^c = 0.5 \quad c = \frac{1}{6} \quad (2)$$

因此, 上述隶属度函数(式(1))为

$$p_{mn} = \begin{cases} 0 & x_{mn} \leq 0.000\ 000 \\ \left(\frac{x_{mn}}{x_{max}}\right)^{1/6} & 0.000\ 000 < x_{mn} < x_{max} \\ 1 & x_{mn} \geq x_{max} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$ 。

在短裂纹监测信号处理时经常希望感兴趣的监测信号得到某种程度的增强, 因此选用如下的增强算子:

$$p'_{mn} = \begin{cases} 2p_{mn}^2 & p_{mn} < 0.5 \\ 1 - 2(1 - p_{mn})^2 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

容易发现, 经过增强算子增强后, 1 个像素含短裂纹特征的程度变得更加明确。

结合式(3)和式(4)可给出如下的模糊增强算法:

(1) 给定 4 个相邻的切片, 采用 $4 \times 4 \times 4$ 合并处理, 得到 1 个合并后的切片, 记为 slice, 切片大小为 16×16 。

(2) 根据式(3)计算 slice 中每一个像素(第 (m, n) 个像素处的灰度值为 x_{mn})的隶属度 p_{mn} 。

$$p_{mn} = G(x_{mn}) \quad (5)$$

(3) 根据式(4)对上述隶属度进行增强处理, 得到增强后的隶属度 p'_{mn} 。

(4) 计算式(3)的反变换 G^{-1} , 得到相应的已增强的重建值 x'_{mn} (即检测信号)。

$$x'_{mn} = G^{-1}(p'_{mn}) \quad (6)$$

图 5 是对 3 维合并处理结果(图 4(b))采用模糊增强处理后的显示结果(此处 x_{max} 取值为 0.557)。从图 5 中可看出, 突变信号得到了增强, 同时当前未突变信号并未得到增强, 这种隶属度模糊增强的方法, 有助于短裂纹扩展监测。

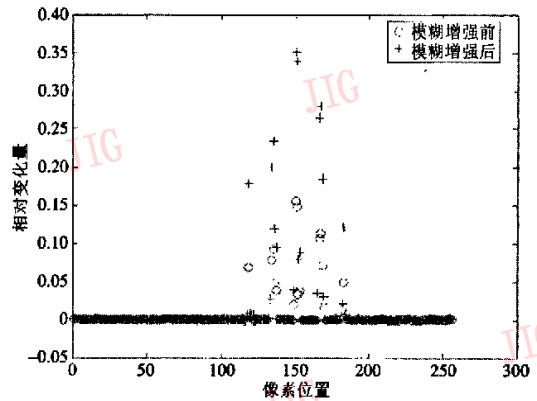


图 5 模糊增强处理

Fig. 5 Enhancement based on fuzzy sets

5 结 论

本文利用扩展体素建模的方法构建了非均匀密

度场,对密度场图像的相对变化展开了 2 维和 3 维分析,通过引入图像隶属度,研究了短裂纹活动宏观行为的模糊增强方法,增强了短裂纹活动引起的感兴趣监测信号,从而有助于密度场图像的定量分析。由于密度场图像的演化分析是在低分辨率图像上进行的,因此,本文建立了仿真路线与真实实验路线之间的统一。

上述工作是建立在仿真实验的基础上的,但根据实际 CT 扫描装置的情况,CT 重建结果不可避免地存在噪声的影响。因此下一步的工作将是建立短裂纹群活动引起切片灰度变化的判断准则,以判别切片灰度变化是由噪声引起的,还是由短裂纹群活动引起的。

参考文献 (References)

- 1 Xu Zhang-sui, Xu Ying, Wang Jian-bin, *et al.* The Principle and Application of Crack Leakage Magnetic Quantitative Test [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 115 ~ 150. [徐章遂,徐英,王建斌等. 裂纹漏磁定量检测原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2005: 115 ~ 150.]
- 2 Jiang Hsieh. Computed Tomography: Principle, Design, Artifact and Development [M]. (translated by zhang chao-zong). Beijing: Sciences Press, 2006: 1 ~ 46. [Jiang Hsieh 著. 计算机断层成像技术:原理、设计、伪像和进展[M]. 张朝宗译. 北京:科学出版社, 2006:1 ~ 46.]
- 3 Legorju-jago K, Bathias C. Fatigue initiation and propagation in natural and synthetic rubbers[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(2-4): 85 ~ 92.
- 4 Desischer H P, Kottar A, Foroughi B. Determination of local mass density distribution [A]. In: Eric Maire. X-Ray Tomography in Material Science[C], Paris: HERMES Science Publications, 2000: 165 ~ 175.
- 5 Greene N. Voxel space automata: modeling with stochastic growth processes in voxel space [J]. Computer Graphics, 1989, 23(3): 175 ~ 184.
- 6 Liu Xin-yu. Research of Uneven Density Field Modeling and Arithmetic of CT Computer Simulation and Projection [D]. Dissertation of Degree of Master in Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 2005. [刘欣瑜. 非均匀密度场的建模与 ICT 仿真投影计算方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005.]