

用于核级石墨断裂分析的相位测量技术研究

王琳霖, 曹国强, 王亚杰, 李正强, 王路平, 吴燕燕

沈阳航空航天大学工程训练中心, 辽宁 沈阳 110136

摘要 核级石墨是高温气冷反应堆堆芯的主要构件材料, 石墨材料的断裂性能研究和裂纹扩展过程分析对石墨构件的结构完整性分析具有重要意义。基于径向基函数(RBF)的滤波方法适合于低密度电子散斑干涉(ESPI)图的滤波, 提出基于径向基函数滤波与质量图引导的解包裹算法结合的相位测量方法, 通过模拟相位图对该方法进行验证, 同时将其与传统的均值滤波方法进行定量比较。采用 ESPI 技术和三点弯曲方法对核级石墨试件的断裂行为进行测量, 实验样本带有预制裂纹, 记录裂纹演化过程中不同载荷下的 ESPI 包裹相位图, 利用基于径向基函数滤波与质量图引导的解包裹算法获得各个时刻的相位等值线, 给出了试件裂纹演化过程曲线图。结果表明, 该方法可对核级石墨的裂纹演化进行有效的测量。

关键词 测量; 散斑干涉; 核级石墨; 径向基函数滤波; 相位解包裹

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031203

Research of Phase Measurement Techniques for Fracture Analysis of Nuclear Graphite

Wang Linlin, Cao Guoqiang, Wang Yajie, Li Zhengqiang, Wang Luping, Wu Yanyan

Engineering Training Center, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China

Abstract Nuclear graphite is the primary structural material of reactor core in the high temperature gas-cooled reactor. It is of great significance for the research of the graphite's fracture property and the analysis of the crack propagation process to analyze the structural integrity of graphite component. The filtering method based on radial basis function (RBF) is suitable for electronic speckle pattern interferometry (ESPI) speckle patterns with low density. A kind of phase measuring method base on RBF filtering and quality-guided phase-unwrapping algorithm is proposed, then this method is tested via application to computer-simulated ESPI phase pattern and compared with the average filtering quantitatively. ESPI technique and three-point bending tests are employed to measure the fracture property of nuclear graphite specimen with pre-cracking. The ESPI wrapping phase patterns are recorded with different loads in the evolutionary process of crack, and the phase contours are extracted by the use of RBF filtering method and quality-guided phase-unwrapping algorithm, then the evolutionary process sketch map of the specimen is given. The experimental results demonstrate that this method is effective to measure the crack evolutionary process of nuclear graphite.

Key words measurement; speckle interferometry; nuclear graphite; radial basis function filtering; phase unwrapping

OCIS codes 120.6160; 100.5088; 100.2650; 200.4560

1 引言

核级石墨作为高温气冷反应堆堆芯的主要构件材料, 对保证反应堆的安全运行和完整性至关重要。

使用过程中, 堆芯石墨构件将承受机械载荷、热应力以及由地震等外力引起的循环载荷等, 在运行寿命后期, 这些应力容易使石墨构件产生较大的应力变形, 进而产生裂纹, 从而影响整个堆芯结构的尺寸和

收稿日期: 2017-05-18; **收到修改稿日期:** 2017-08-14

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20170540701)、辽宁省教育厅项目(L2015411)

作者简介: 王琳霖(1981—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事现代光学测试技术与光信息处理、图像处理等方面的研究。

E-mail: wlin_23@163.com

结构完整性^[1]。因此研究石墨材料的断裂性能,对反应堆石墨构件的结构完整性分析具有重要意义^[2]。

径向基函数(RBF)是一种多变量插值方法,具有精度高、计算简单、逼近能力强等特点。径向基函数不断受到研究人员的关注,并在图像处理、数学、控制等领域都得到了成功应用。近年来,在光学无损检测技术中,径向基函数受到了一定的关注。2010年,Tang等^[3]提出了基于径向基函数与数字散斑相关法结合的位移场分析方法,该方法在计算效率和计算精度上都得到了极大提高。2011年,Wang等^[4]将径向基函数插值应用于单幅电子散斑条纹图的相位信息提取。2013年,王琳霖^[5]将径向基函数平滑插值应用于离散余弦解包裹相位的再处理中,降低了再处理后的相位的均方根误差。2015年,Dai等^[6]将径向基函数应用于瞬时相位测量干涉中。王琳霖等^[7]提出了一种低密度电子散斑干涉(ESPI)条纹图的径向基函数滤波方法。应用于ESPI图的滤波方法频率域中的窗傅里叶法和局域傅里叶滤波法是两种经典的滤波方法。空间域中,基于偏微分方程的滤波模型是一种重要的有代表性的滤波方法。以上方法在高密度的条纹图处理中具有较强的优势,但对低密度条纹图滤波方法的研究还较少。基于径向基函数的滤波方法不需要求取条纹的方向,在处理低密度条纹图上具有一定的创新和实用价值。实际上,通过对相位图做一定的变化处理,径向基函数滤波方法也可用于ESPI相位图中。

对ESPI相位图的信息提取,相移技术^[8-9]应用广泛。它通过移项增加若干常量而得到多幅条纹图来求解相位场,能够提供更高精度的结果。相移技术通过引入相移获得的多幅物面散斑图的加或减运算,求解出物面上各点变形的相位信息。通过相移技术获得的相位被截断在 $[-\pi, \pi]$ 范围内,为得到反映变形信息的连续相位,需要将包裹相位恢复为真实相位。对于相位解包裹算法,相关学者对其作了大量研究^[8-13],最小二乘法、分支切割法、基于质量图的路径跟踪法、掩模分割算法等都是经典的解包裹算法。基于质量图的路径跟踪法通过以相位梯度、二阶导数等为依据的质量图的指引,设置解包裹路径由高质量区域经过低质量区域,成为一种可靠有效的方法^[14]。2015年,陆军等^[15]提出一种基于构造边的精确快速相位解缠算法,该算法在相位导数偏差质量图的基础上根据各像素点质量值确定构

造边的权值,致力于处理复杂且尺寸大的相位图。在本文中,需要处理的相位图密度变化较小,因此采用基于质量图的相位解包裹方法。

核级石墨为脆性材料,研究其裂纹扩展过程,对于核级石墨构件的安全运行具有重要意义。目前,国内外开展了相关的实验研究。Su等^[16]利用ESPI技术对含裂纹的核级石墨进行三点弯曲实验研究,确定其拉伸软化曲线、断裂韧度和断裂能;Kim等^[17]采用直流电位(DCPD)和移动显微镜相结合的方法对核级石墨进行了三点弯曲单边缺口实验,测量裂纹萌生及随后的裂纹扩展行为;史力等^[2]采用数字散斑相关法和电测法相结合的方法测试石墨试件的断裂韧性,得到了其变形场和应变场。杨娜^[18]对核级石墨三点弯曲内位移ESPI条纹图进行了处理及条纹骨架线提取。王伟^[19]对IG-11石墨试件进行了四点弯实验,并利用数字图像相关方法获得 x 方向位移场和应变场,王显^[20]用数字图像相关方法对石墨在不同温度下的变形进行测量,得到了对应的应力应变曲线,给出了其压缩弹性模量随温度的变化关系。以上文献大多利用数字散斑相关法或电子散斑条纹图对核级石墨的断裂性能展开研究,本文利用核级石墨ESPI相位图对其裂纹扩展进行测量。

本研究提出一种基于径向基函数相位图滤波方法与质量图解包裹算法相结合的相位信息提取方法,利用该方法对带有预制裂纹的核级石墨三点弯曲载荷下获得的相位图进行测量,获得了核级石墨在三点弯曲载荷下动态裂纹演化示意图。

2 基本原理

2.1 径向基函数滤波原理简介

利用相移技术获得的包裹相位图提取全场相位首先要对包裹相位图进行滤波处理,再由解包裹算法获得全场相位。

文献^[7]给出了径向基函数插值滤波模型:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mu \mathbf{I} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\mu \geq 0$, \mathbf{I} 为与矩阵 \mathbf{A} 大小相同的单位阵, \mathbf{P} 为多项式组成的空间, \mathbf{C} 为多项式对应的系数, \mathbf{W} 为径向基函数的系数, \mathbf{F} 为插值条件。参数 μ 用于平衡数据的平滑程度和保真度。 μ 越大,逼近数据越光滑, μ 越小,逼近数据越接近真实函数。

基于径向基函数插值的滤波方法的实现步骤:

- 1) 设定采样间隔 h ,利用该间隔确定图像上的均匀采样点;
- 2) 选取若干采样点的邻节点;
- 3) 以采样点

为中心,以步骤 2)中选定的邻节点为插值条件,用径向基函数实现平滑插值,并将插值结果作为采样点新的像素值;4) 分别以采样点及其新的像素值为中心点和插值条件,利用径向基函数平滑插值出整幅图像,获得平滑后的图像。

常用的径向基函数有薄板样条函数、高斯函数、MultiQuadric(MQ)函数和逆 MQ 函数等。薄板样条函数主要适合于两个变量的光滑函数,高斯函数主要适用于神经网络,MQ 函数 $\phi(r) = (r^2 + c^2)^\gamma$ 应用范围广,且其含有两个参数,可方便控制滤波效果,其中 r 为任意点到原点的距离, c 为形状参数,本研究选择 MQ 函数作为基函数。因此,基于径向基函数的滤波方法的参数包括:采样间隔 h 、采样点邻节点数量 $m_1 \times n_w$ 、平滑插值采样点时的形状参数 c_1 、平滑参数 μ_1 、平滑插值整幅图像时的形状参数 c_{all} 、平滑参数 μ_{all} 。采样间隔的选取应根据条纹的密度及图像尺寸确定,通常取 5~20 之间。采样邻节点数量可根据采样点周围条纹密度选取 $2 \times 2 \sim 8 \times 8$ 个节点。MQ 函数的形状参数 c 选择不变形参数,通常取 $0 < c \leq 2$ 。平滑参数 μ 的选取与噪声强度成正比,为了保证滤波效果,采样点处的 μ_1 取值稍大,而平滑插值整幅图像时的平滑参数 μ_{all} 一般应选择较小的数值。

$$q_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{m,n}^x)^2 + \sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{m,n}^y)^2}}{k \times k}, \quad (2)$$

式中 k 为以 (m,n) 为中心的方形窗口大小, $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 分别为 x 、 y 方向的包裹相位梯度, $\Delta_{m,n}^x$ 、 $\Delta_{m,n}^y$ 为以 (m,n) 为中心的 $k \times k$ 窗口内包裹相位梯度的平均值。

3 实验结果

3.1 模拟与结果分析

利用计算机模拟的相位图验证径向基函数对相位图的滤波效果,并与均值滤波进行比较。同时利用基于质量图的相位解包裹算法和基于离散余弦变换(DCT)的最小二乘相位解包裹算法分别对滤波结果进行解包裹处理。图 1 是对模拟噪声相位图的滤波及解包裹结果,图 1(a)是模拟强噪声相位图;图 1(b)是均值滤波 100 次的结果;图 1(c)是径向基函数滤波结果,其中 $h=6$, $m_1 \times n_w = 3 \times 3$, $c_1=2$, $\mu_1=200$, $c_{all}=1$, $\mu_{all}=50$;图 1(d)是利用基于质量图的相位解包裹算法对无噪声包裹相位图进行解包裹

ESPI 相位图具有锯齿形跳变的特点,不能直接将条纹图的滤波方法用于相位图的滤波,但可通过对相位图做 e 指数变换进行滤波,滤波后再求 e 指数图像的相角获得滤波后的 ESPI 相位图。假设给定包裹相位图 $\varphi_w(x,y)$,其 e 指数形式为 $f(x,y) = \exp[j\varphi_w(x,y)]$,其中 $j = \sqrt{-1}$ 。滤波后利用 $\phi = \text{angle}[f(x,y)]$ 求 $f(x,y)$ 的相角得到滤波相位图。

2.2 质量图引导的算法描述

质量图引导路径积分相位展开法是用一个表征包裹相位质量的质量图引导积分路径展开相位。算法首先选择一个具有高品质值的像素作为起始点,对相邻的 4 个节点解包裹并记录。从中选取品质值最高的点,若该品质值最高点的四邻域还未解包裹,则按同样的方式将其解包裹并记录到该毗邻表中。如此循环直到所有的点都已解包裹为止。这样,所有品质值高的像素首先被展开,然后是质量值低的像素。常见的描述质量图的方式有相关质量图、伪相关质量图、相位导数偏差质量图、最大相位梯度质量图等。在这些描述方式中,相位导数偏差质量图对包裹相位数据的质量估计更为可靠^[14]。相位导数偏差质量图用于表示包裹相位数据导数的统计变化特征,包裹相位图中 (m,n) 处的相位导数偏差定义为:

后的三维相位图;图 1(e)是利用基于质量图的相位解包裹算法对图 1(b)解包裹后的三维相位图;图 1(f)是利用基于质量图的相位解包裹算法对图 1(c)解包裹后的三维相位图;图 1(g)是利用基于 DCT 的最小二乘相位解包裹算法对图 1(b)解包裹后的三维相位图;图 1(h)是利用基于 DCT 的最小二乘的相位解包裹算法对图 1(c)解包裹后的三维相位图。

采用均方差(MSE)作为评价参数,其定义公式为:

$$x_{\text{MSE}} = \frac{1}{M \times N} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [u(i,j) - I(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j)]^2}, \quad (3)$$

式中 $M \times N$ 表示图像大小, I 为无噪声的理想相位图, u 为滤波结果。

均值滤波结果和径向基函数滤波结果的 MSE 分别为 4.26×10^{-7} 和 3.87×10^{-7} 。同时利用基于质量图的相位解包裹算法对均值滤波相位图和径向基函数滤波相位图进行解包裹,计算解包裹后的 MSE 分别为 5.23×10^{-9} 和 4.6×10^{-9} 。利用基于 DCT 的

最小二乘相位解包裹算法进行解包裹的 MSE 分别为 4.35×10^{-8} 和 3.61×10^{-8} 。根据以上结果可知,径向基函数滤波模型与基于质量图的相位解包裹算法适合于强噪声、低密度的相位图滤波,滤波结果更准确。

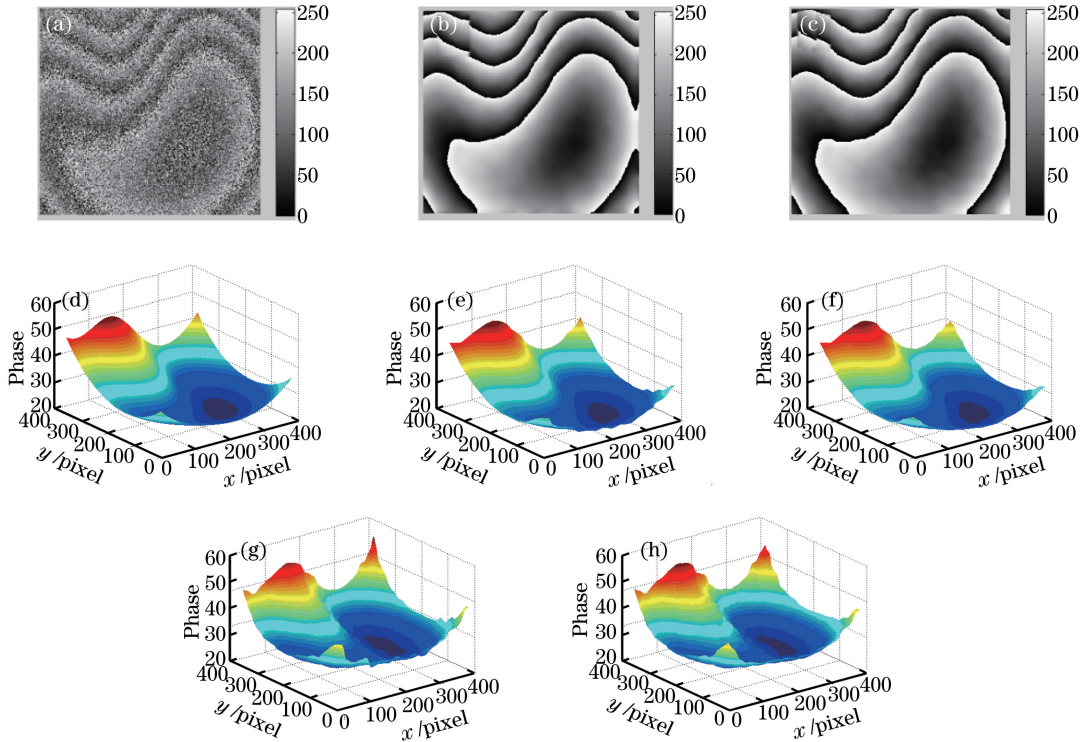


图1 模拟噪声相位图滤波及解包裹结果。(a)模拟相位图;(b)均值滤波;(c)径向基函数滤波;(d)无噪声相位图解包裹;(e)基于质量图的方法对(b)图的解包裹相位;(f)基于质量图的方法对(c)图的解包裹相位;(g) DCT方法对(b)图的解包裹相位;(h) DCT方法对(c)图的解包裹相位

Fig. 1 Filtering and unwrapping results of computer-simulated noise phase pattern. (a) Computer-simulated phase pattern; (b) filtering result of mean value; (c) filtering result of RBF; (d) unwrapping result of noiseless phase pattern; (e) unwrapping result of Fig. (b) with quality map method; (f) unwrapping result of Fig. (c) with quality map method; (g) unwrapping result of Fig. (b) with DCT method; (h) unwrapping result of Fig. (c) with DCT method

3.2 实验验证

实验时,采用三点弯曲方法对含预制裂纹的核级石墨试件施加载荷。样本长 220 mm,高 50 mm,厚 25 mm,预制裂缝长度 20 mm,在梁的下端左右对称位置处固定两个支点,固定位置距试件两端各 10 mm,施加载荷处于试件上端中心位置,如图 2 所示。

图 3 为不同时刻下载荷逐渐增强时获得的核级石墨 ESPI 包裹相位图,实验过程中共采集了 16 幅包裹相位图,图 3 从第一幅相位图开始,给出了每间隔 3 个时刻的 6 幅相位图,并对其进行分析。

选用基于径向基函数的相位图滤波方法对含噪声的包裹相位图进行滤波处理,图 4 为用径向基函数对图 3 滤波后的结果。由图 4 可以看出,经过径

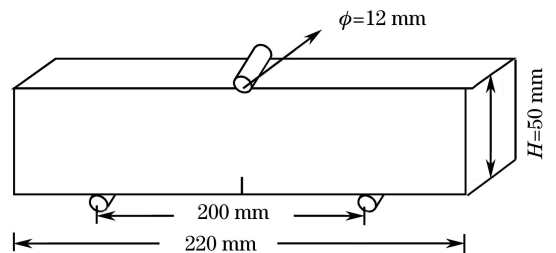


图2 三点弯曲实验样本

Fig. 2 Specimen of three-point bending

向基函数滤波方法处理后的包裹相位图噪声得到了抑制,边缘较清晰。图 3(a)~(c)的相位图密度较低,图 3(d)~(f)的密度虽然较前几幅图有所提高,但密度变化较小,图 4 的滤波结果证明了基于径向基函数的滤波方法适合于低密度相位图滤波的这一

特点。

图 5 为利用基于质量图的相位解包裹算法对图 4 进行解包裹得到的解包裹相位,其中质量图采用

相位导数偏差质量图。解包裹后的相位图对相位进行了较好的展开,除在试件裂缝处稍有瑕疵外,其他区域获得了理想的相位展开结果。

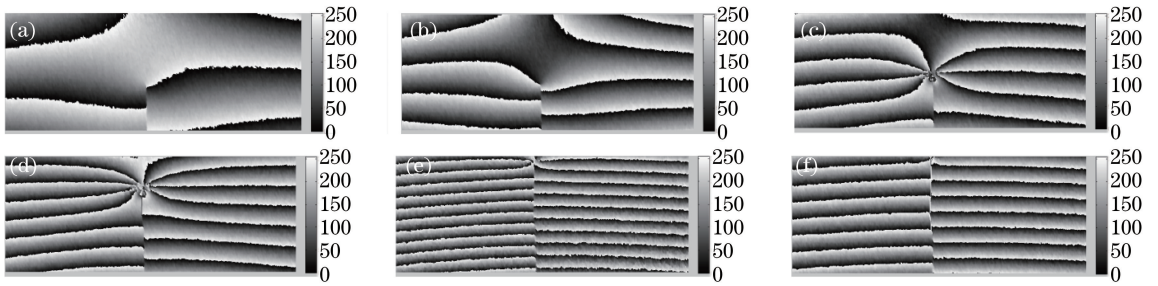


图 3 不同时刻下的核级石墨 ESPI 相位图。(a)第 1 个时刻;(b)第 3 个时刻;(c)第 7 个时刻;(d)第 10 个时刻;(e)第 13 个时刻;(f)第 16 个时刻

Fig. 3 Nuclear graphite ESPI phase patterns at different moments. (a) 1st moment; (b) 3rd moment; (c) 7th moment; (d) 10th moment; (e) 13th moment; (f) 16th moment

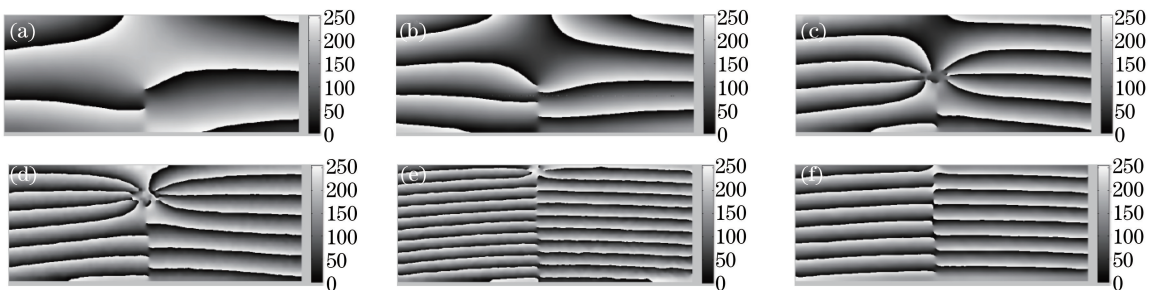


图 4 径向基函数滤波方法对图 3 的滤波结果。(a) $h=8, m_1 \times n_w=4 \times 4, c_1=2, \mu_1=200, c_{all}=1, \mu_{all}=40$; (b) $h=8, m_1 \times n_w=4 \times 4, c_1=2, \mu_1=200, c_{all}=1, \mu_{all}=40$; (c) $h=8, m_1 \times n_w=4 \times 4, c_1=2, \mu_1=100, c_{all}=1, \mu_{all}=20$; (d) $h=8, m_1 \times n_w=3 \times 3, c_1=1, \mu_1=10, c_{all}=1, \mu_{all}=2$; (e) $h=6, m_1 \times n_w=2 \times 2, c_1=2, \mu_1=50, c_{all}=1, \mu_{all}=10$; (f) $h=8, m_1 \times n_w=4 \times 4, c_1=2, \mu_1=200, c_{all}=1, \mu_{all}=30$

Fig. 4 Filtering results of Fig.3 by RBF filtering method. (a) $h=8, m_1 \times n_w=4 \times 4, c_1=2, \mu_1=200, c_{all}=1, \mu_{all}=40$; (b) $h=8, m_1 \times n_w=4 \times 4, c_1=2, \mu_1=200, c_{all}=1, \mu_{all}=40$; (c) $h=8, m_1 \times n_w=4 \times 4, c_1=2, \mu_1=100, c_{all}=1, \mu_{all}=20$; (d) $h=8, m_1 \times n_w=3 \times 3, c_1=1, \mu_1=10, c_{all}=1, \mu_{all}=2$; (e) $h=6, m_1 \times n_w=2 \times 2, c_1=2, \mu_1=50, c_{all}=1, \mu_{all}=10$; (f) $h=8, m_1 \times n_w=4 \times 4, c_1=2, \mu_1=200, c_{all}=1, \mu_{all}=30$



图 5 (a)~(f)分别为图 4(a)~(f)的解包裹相位图

Fig. 5 (a)-(f) Unwrapping phase images of Fig.4 (a)-(f), respectively

图 6 为解包裹相位等值线图。图 6(a)和(b)是载荷初期的相位等值线图,此时相位变化缓慢;从图 6(c)开始,相位发生急剧变化,此时在预制开口尖端处载荷集中;随着载荷的增加,图 6(d)~(e),相位

急剧变化区域不断向上延伸,至图 6(f)时,相位变化最大区域到达试件最上端。

实验过程中,加载前,预制开口尖端没有裂缝。在图 5 解包裹相位图中,可以清晰地看到预制开口

以及在开口处出现新裂纹并不断扩展的现象。通过记录每幅解包裹图像中预制开口及新裂纹扩展的位置,得到试件裂纹的演化过程曲线。图 7 是试件裂纹演化过程示意图,由图 7 可看出,试件承受载荷时,从

第 1 个时刻到第 6 个时刻,试件切口尖端应变变化缓慢。随着载荷的不断增大,试件预制开口尖端应力集中,在第 6 个时刻之后,应变急剧增大,开口尖端出现微裂缝,载荷继续增加,裂缝不断扩展,直至试件断裂。

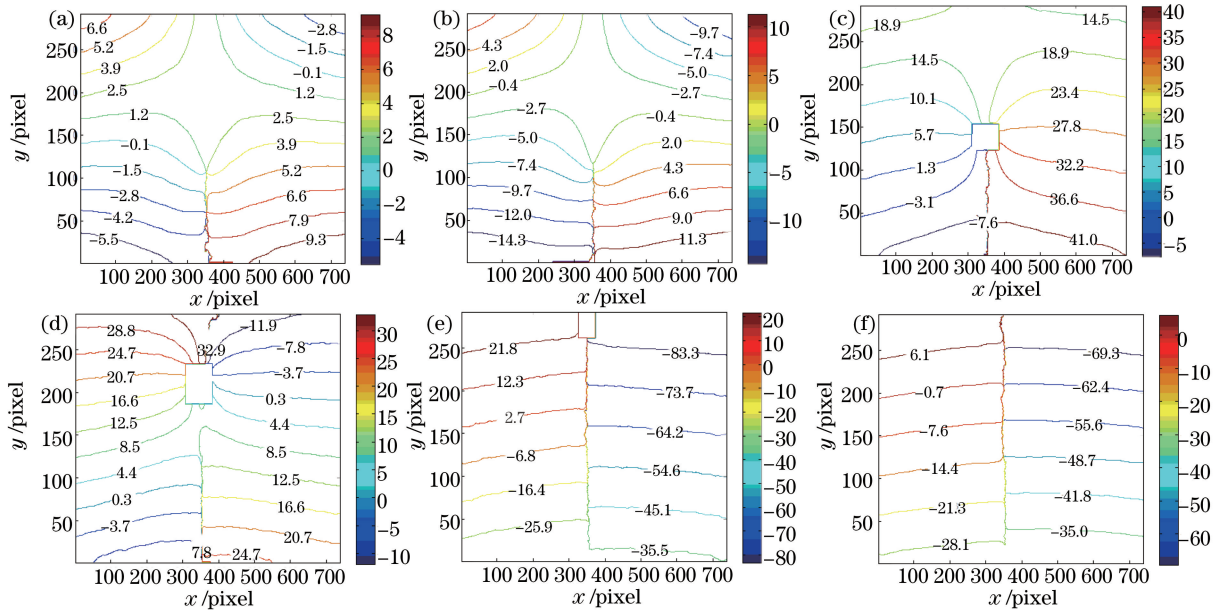


图 6 (a)~(f)分别为图 5(a)~(f)的解包裹相位等值线

Fig. 6 (a)-(f) Contour lines of unwrapping phase of Fig. 5(a)-(f), respectively

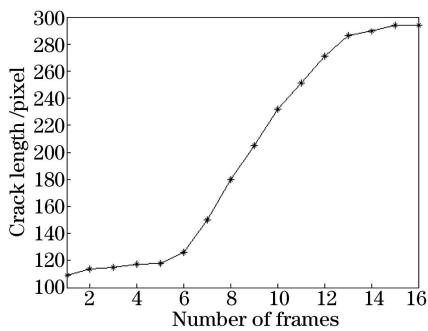


图 7 试件裂纹演化示意图

Fig. 7 Schematic of crack evolution of specimen

4 结 论

基于 ESPI 信息提取技术,提出了基于径向基函数及质量图引导的低密度相位图相位测量方法,利用 MSE 定量分析了该方法的有效性,并与均值滤波方法及 DCT 解包裹结合的算法进行了比较,该方法适合于高噪声、低密度相位图。针对核级石墨的断裂韧性问题,对含预制开口的三点弯曲试件的断裂过程及裂缝尖端位移场进行了测量,得到了较理想的测量结果。实验结果表明,当采集到第 6 帧图像时,预制开口开裂,随着载荷增加,试件裂纹不断扩展直至断裂。对核级石墨断裂性能的深入研究,可为石墨构件的结构完整性分析提供参考。

参 考 文 献

- [1] Wang P, Wang Y, Yu S Y. Characterization of porosity development in oxidized nuclear graphite[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(20): 19-24.
王鹏,王瑶,于溯源.核级石墨氧化后孔隙结构表征[J].科技导报,2012,30(20):19-24.
- [2] Shi L, Wang H T, Wang H T, *et al.* Experimental study on fracture toughness of nuclear graphite[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(S1): 185-188.
史力,王洪涛,王海涛,等.核级石墨材料断裂韧性实验研究[J].核动力工程,2011,32(S1):185-188.
- [3] Tang C, Wang L. Displacement field analysis based on the combination digital speckle correlation method with radial basis function interpolation[J]. Applied Optics, 2010, 49(24): 4545-4553.
- [4] Wang G, Yang J, Han C. Application of the radial basis function interpolation to phase extraction from a single electronic speckle pattern interferometric fringe[J]. Applied Optics, 2011, 50(19): 3110-3117.
- [5] Wang L L. The comparison of several filtering methods for ESPI and research on speckle information extraction based on RBF[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 69-71.

- 王琳霖. 几种 ESPI 滤波方法的比较及基于 RBF 散斑信息提取方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2013: 69-71.
- [6] Dai X, Shao X, Yang F, *et al.* Non-destructive strain determination based on phase measurement and radial basis function [J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 348-358.
- [7] Wang L L, Tang C. ESPI filtering method based on radial basis function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s210006.
王琳霖, 唐晨. 基于径向基函数的 ESPI 滤波方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s210006.
- [8] Surrel Y. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(1): 51-60.
- [9] Gao T. The construction of a class of oriented anisotropy filter masks and theirs application [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 37-38.
高涛. 一族各向异性方向滤波模板的构造及应用 [D]. 天津: 天津大学, 2012: 37-38.
- [10] Wu J, Zhou H, Wu D, *et al.* Study of phase unwrapping algorithm from the undersampled phase [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051003.
吴杰, 周皓, 吴丹, 等. 欠采样条件下相位解包裹算法的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051003.
- [11] Zhang H Q, Guo R H, Jiang C, *et al.* Improved path-independent phase unwrapping algorithm based on total-variation minimum denoising [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121202.
张辉钦, 郭仁慧, 蒋超, 等. 改进的基于全变分最小去噪的路径无关相位解包裹算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121202.
- [12] Guo R H, Li J X, Zhu R H. Seed point unwrapping algorithm based on DCT algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212006.
郭仁慧, 李建欣, 朱日宏. 基于 DCT 算法的种子点相位解包裹算法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0212006.
- [13] Wang H Y, Liu Z Q, Liao W, *et al.* Comparison of four phases unwrapping algorithm based on method of minimum norm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209016.
王华英, 刘佐强, 廖薇, 等. 基于最小范数的四种相位解包裹算法比较 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209016.
- [14] Zhang X Q. Research of phase unwrapping based on quality map [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 15-27.
张晓秋. 基于质量图的相位展开方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 15-27.
- [15] Lu J, Li J C, Wang C C, *et al.* An accurate and fast phase unwrapping algorithm based on constructed edge [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(1): 122-129.
陆军, 李积江, 王成成, 等. 基于构造边的精确快速相位解缠算法 [J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(1): 122-129.
- [16] Su R K L, Chen H H, Fok S L, *et al.* Determination of the tension softening curve of nuclear graphites using the incremental displacement collocation method [J]. *Carbon*, 2013, 57(3): 65-78.
- [17] Kim D J, Oh S J, Jang C H, *et al.* Fracture toughness and crack growth resistance of the fine grain isotropic graphite [J]. *Carbon Science*, 2006, 7(1): 19-26.
- [18] Yang N. The study on edge-preserving filtering methods in spatial domain and their applications in three-point bending experiment of nuclear graphite [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 40-49.
杨娜. 空间域保边滤波方法及在核级石墨三点弯曲实验中的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2013: 40-49.
- [19] Wang X. Spatio-temporal continuum digital image correlation method and its applications [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014: 84-89.
王显. 考虑时/空连续性的数字图像相关方法及其应用 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014: 84-89.
- [20] Wang W. The application of digital image correlation method on high temperature deformation test of thermal structure material [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 41-45.
王伟. 数字图像相关方法在热结构材料高温变形测试中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 41-45.